

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

KEYLA JUNKO SHINOHARA

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO DO CONCRETO
ASFÁLTICO MODIFICADO PELO POLÍMERO EVA NO
MÓDULO COMPLEXO E NA FADIGA**

Dissertação apresentada ao
Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil da Universidade
Federal de Santa Catarina, como
parte dos requisitos para a
obtenção do título de Mestre em
Engenharia Civil.

**Professor Orientador:
Dr. Leto Momm**

Florianópolis - SC
2012

Catálogo na fonte pela Biblioteca Universitária da
Universidade Federal de Santa Catarina

S556e Shinohara, Keyla Junko

Estudo do comportamento do concreto
asfáltico modificado pelo polímero EVA no
módulo complexo e na fadiga [dissertação] /
Keyla Junko Shinohara; orientador, Leto Momm
- Florianópolis, SC, 2012.

205 p.: il., grafs.

Dissertação (mestrado) - Universidade
Federal de Santa Catarina, Centro
Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil.

Inclui referências

1. Engenharia Civil. 2. Concreto
asfáltico. 3. Polímero EVA. I. Momm, Leto. II.
Universidade Federal de Santa Catarina.
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.
III. Título.

CDU 624

KEYLA JUNKO SHINOHARA

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO DO CONCRETO
ASFÁLTICO MODIFICADO PELO POLÍMERO EVA NO
MÓDULO COMPLEXO E NA FADIGA**

Dissertação apresentada ao
Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil da Universidade
Federal de Santa Catarina, como
parte dos requisitos para a
obtenção do título de Mestre em
Engenharia Civil.

**Professor Orientador:
Dr. Leto Momm**

Florianópolis - SC
2012

ESTUDO DO COMPORTAMENTO DO CONCRETO ASFÁLTICO MODIFICADO PELO POLÍMERO EVA NO MÓDULO COMPLEXO E NA FADIGA

Esta dissertação foi julgada para a obtenção do título de MESTRE em Engenharia, especialidade em ENGENHARIA CIVIL, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina.

Prof. Dr. Leto Momm – Orientador
Departamento de Engenharia Civil – UFSC

Prof. Dr. Roberto Caldas de Andrade Pinto
Coordenador do Curso do PPGEC – UFSC

Comissão Examinadora:

Prof. Dra. Liedi Légi Bariani Bernucci
Departamento de Engenharia Civil – USP

Prof. Dr. Orlando Martini de Oliveira
Departamento de Engenharia Civil – UFSC

Prof. Dra. Liseane Padilha Thives
Departamento de Engenharia Civil – UFSC

Florianópolis - SC
2012

*“O mundo ao meu redor
é obra de minha própria autoria.”*

Seicho-no-ie

*Dedico esse trabalho aos meus pais,
Alberto Tetsuo Shinohara e Yolanda
Fumie Shinohara, e aos meus irmãos
queridos, Karen Lie Shinohara,
Kleber Hiroaki Shinohara e Kleyton
Hiroki Shinohara.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Leonardo Corrêa Chaves pelo apoio e companheirismo durante todas as etapas dessa dissertação. Muito obrigada pelas palavras de carinho e compreensão mesmo nos momentos mais difíceis.

Ao meu orientador, professor Leto Momm, por todos os ensinamentos e direcionamentos que muito necessitei durante todo o curso acadêmico.

Aos meus amigos de laboratório Carlos, Yader, José Marcos, Aduzindo, Otto, Greice e Breno por tornar o trabalho árduo em momentos agradáveis. Obrigada por sempre estarem dispostos a me ajudar, principalmente com palavras de incentivo.

Muito obrigada à professora Liedi Légi Bariani Bernucci, ao professor Dr. Orlando Martini de Oliveira e à professora Dra. Liseane Padilha Thives por aceitarem fazer parte da banca examinadora, pela paciência e por contribuírem, em muito, para a melhoria da minha pesquisa.

À CAPES, pela bolsa de estudos concedida durante os dois anos do curso de pós-graduação.

À BRASKEM pelo fornecimento do polímero EVA utilizado nessa pesquisa.

À CBB pelo fornecimento do ligante asfáltico, pela disponibilização do Laboratório de Ensaio e pelo apoio do Engenheiro Luiz Henrique Teixeira, Engenheira Cristiane Câmara e do laboratorista Marcos.

Ao Laboratório de Tecnologia em Pavimentação da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo que me auxiliou na usinagem e nos ensaios de Deformação Permanente. Muito obrigada ao Engenheiro Edson de Moura, ao laboratorista Erasmo e, novamente, à professora Dra. Liedi Légi Bariani Bernucci.

Agradeço à minha madrinha Laura Tsukimi Shinohara e minha tia Amália Yoko Shinohara por sempre estarem dispostas a me ajudar e mostrarem a importância do bom convívio familiar para o meu crescimento.

A minha avó querida Adélia Shinohara que me faz sorrir a cada dia que a vejo.

Aos meus avós Momoe So Kawakami, Kunio Kawakami e Takeo Shinohara que me fazem muita falta, mas pra sempre estarão presentes em meu coração.

Agradeço muito aos meus irmãos pela infância divertida e feliz que presenciei ao lado deles e pelo companheirismo nos melhores momentos da minha vida.

Agradeço a minha mãe por todo o carinho, colo, dedicação e amor incondicional que tenho recebido durante toda a minha vida.

Agradeço ao meu pai, meu herói e maior incentivador em todas as minhas batalhas. Obrigada pela incessante torcida, por permitir à concretização dos meus vários sonhos e por me mostrar o quanto a vida é bela!

E por último, mas não menos importante, o agradecimento a Deus por mais essa conquista tão importante em minha vida. *Domo arigatou.*

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	xi
LISTA DE TABELAS	xvii
LISTA DE ABREVIACÕES E SIGLAS	xix
LISTA DE SÍMBOLO	xxi
RESUMO	xxiii
ABSTRACT	xxv

CAPÍTULO 1.....	33
------------------------	-----------

1 - INTRODUÇÃO.....	33
----------------------------	-----------

1.1 - CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	33
-----------------------------------	----

1.2 - OBJETIVO GERAL	35
----------------------------	----

1.3 - OBJETIVOS ESPECÍFICOS	36
-----------------------------------	----

1.4 - LIMITAÇÕES DO ESPAÇO DA PESQUISA	38
--	----

1.5 - JUSTIFICATIVAS PARA O TEMA PROPOSTO	38
---	----

1.6 - ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	39
-------------------------------------	----

CAPÍTULO 2.....	41
------------------------	-----------

2 - LIGANTE ASFÁLTICO MODIFICADO PELO POLÍMERO EVA.....	41
--	-----------

2.1 - O LIGANTE ASFÁLTICO	41
---------------------------------	----

2.2 - POLÍMERO ETILENO ACETATO DE VINILA (EVA)	44
--	----

CAPÍTULO 3.....	55
------------------------	-----------

3 - MATERIAIS.....	55
---------------------------	-----------

3.1 - AGREGADOS	55
-----------------------	----

3.2 - LIGANTE ASFÁLTICO MODIFICADO PELO EVA.....	60
--	----

3.2.1- Recuperação Elástica.....	63
----------------------------------	----

3.2.2 -	Ponto de Amolecimento.....	65
3.2.3 -	Penetração.....	65
3.2.4 -	Viscosidade Brookfield.....	66
3.2.5 -	Resultados da caracterização dos ligantes modificados.....	67

CAPÍTULO 4.....71

4 - METODOLOGIA DOS ENSAIOS E PREPARAÇÃO DOS CONCRETOS ASFÁLTICOS.....71

4.1 -	ENSAIO DA PCG E ENSAIO DE DOSAGEM MARSHALL	73
4.2 -	ENSAIO DURIEZ.....	78
4.3 -	ENSAIO DE DEFORMAÇÃO PERMANENTE	81
4.4 -	SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS DO ENSAIO DE FADIGA E MÓDULO COMPLEXO.....	86
4.4.1 -	Os componentes da máquina.....	87
4.4.2 -	Aferição da amplitude.....	91
4.4.3 -	Aferição dos sensores de deslocamento.....	92
4.4.4 -	Aferição das células de carga.....	93
4.4.5 -	Início do ensaio para aquisição de dados.....	95
4.5 -	ENSAIO DE MÓDULO COMPLEXO	96
4.5.1 -	Compactação das placas.....	99
4.5.2 -	Serragem dos corpos de prova.....	100
4.5.3 -	Triagem dos corpos de prova.....	106
4.5.4 -	As etapas do ensaio de Módulo Complexo.....	107
4.6 -	ENSAIO DE FADIGA	116

CAPÍTULO 5.....121

5 - RESULTADOS E ANÁLISES DOS ENSAIOS LABORATORIAIS.....121

5.1 -	ENSAIO DE DOSAGEM MARSHALL	121
-------	----------------------------------	-----

5.2 - ENSAIO DURIEZ	124
5.3 - ENSAIO DE DEFORMAÇÃO PERMANENTE.....	128
5.4 - ENSAIO DE MÓDULO COMPLEXO	134
5.4.1- Curvas Isotérmicas.....	139
5.4.2- Curvas Equivalência Frequência-Temperatura.....	141
5.4.3- Curvas Isócronas.....	143
5.4.4- Curvas do Espaço de Black.....	145
5.4.5- Plano Cole-Cole.....	147
5.5 - ENSAIO DE FADIGA	149
5.6 - ANÁLISE DOS RESULTADOS	156
5.6.1- Ensaio de dosagem Marshall.....	157
5.6.2- Ensaio Duriez.....	157
5.6.3- Ensaio de Deformação Permanente.....	158
5.6.4- Ensaio de Módulo Complexo.....	159
5.6.5- Ensaio de Fadiga.....	165
CAPÍTULO 6.....	169
6 - DIMENSIONAMENTO SIMULADO DE UMA ESTRUTURA DE PAVIMENTO.....	169
CAPÍTULO 7.....	179
7 - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	179
7.1 - CONCLUSÕES	179
7.2 - RECOMENDAÇÕES	181
REFERÊNCIAS.....	183

ANEXO 1.....	193
APÊNDICE 1.....	195
APÊNDICE 2.....	197
APÊNDICE 3.....	201
APÊNDICE 4.....	203
APÊNDICE 5.....	205

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	- Estradas brasileiras em números	34
Figura 2	- Sequência de ensaios.....	37
Figura 3	- Defeitos nos pavimentos: (A) Deformação permanente e	43
Figura 4	- Conformação planar das moléculas de EVA.....	44
Figura 5	- Importações do polímero EVA em 2009.....	45
Figura 6	- Exportações do polímero EVA em 2009.....	45
Figura 7	- Curvas termogravimétricas do EVA em atmosfera de ar e N ₂ (ALLEN <i>et al</i> , 2000).	48
Figura 8	- Viscosidade do CAP EVA e CAP convencional	49
Figura 9	- Brita graduada	56
Figura 10	- Curva granulométrica inserida na Faixa "C" do DNIT (QUINTERO, 2011).	58
Figura 11	- Polímero EVA HM-728 em forma de <i>pellets</i>	60
Figura 12	- Modificação do ligante:	63
Figura 13	- Ensaio de Recuperação Elástica:.....	64
Figura 14	- Ensaio de Ponto de Amolecimento:	65
Figura 15	- Ensaio de Penetração:	66
Figura 16	- Viscosímetro Brookfield.	67
Figura 17	- Sequência dos níveis de formulação e os respectivos ensaios	72
Figura 18	- Corpos de prova Marshall antes da pesagem hidrostática.	75
Figura 19	- Pesagem hidrostática do corpo de prova Marshall.....	76
Figura 20	- Homogeneização na estufa dos corpos de prova.....	79

Figura 21	-	Máquina do ensaio Duriez.	79
Figura 22	-	Compactação da placa do ensaio de.....	82
Figura 23	-	Máquina do ensaio de Deformação Permanente.....	83
Figura 24	-	Medidor de deformação e sonda térmica da máquina de Deformação Permanente.	84
Figura 25	-	Pontos de leitura do ensaio de Deformação Permanente.	85
Figura 26	-	Máquina do ensaio de Fadiga e Módulo Complexo.....	86
Figura 27	-	Dispositivo para o ensaio de flexão alternada.....	87
Figura 28	-	Rotor da máquina.....	88
Figura 29	-	Sensor de efeito <i>hall</i>	88
Figura 30	-	Controlador digital superior do sistema de	90
Figura 31	-	Controlador inferior manual do sistema de.....	90
Figura 32	-	Medidor de deslocamento (μ def).	91
Figura 33	-	Aferição do deslocamento.	92
Figura 34	-	Correlação acima de 95% para aferição do deslocamento.	93
Figura 35	-	Aferição das células de carga por ganho e referência... 94	
Figura 36	-	Sistema de aquisição de dados.....	95
Figura 37	-	Temperaturas e frequências de ensaio.	98
Figura 38	-	Início do processo de compactação da placa de Módulo Complexo e Fadiga.	99
Figura 39	-	Bloco de comando da mesa de compactação.....	100
Figura 40	-	Corpo de prova trapezoidal.....	101
Figura 41	-	Resfriamento da serra de corte.....	102
Figura 42	-	Esquema de corte dos corpos de prova trapezoidal	102

Figura 43	- Duas placas de 60 cm x 40 cm x 12 cm alinhadas para o início da serragem.	103
Figura 44	- Quatro metades alinhadas.	104
Figura 45	- Corte dos corpos de prova trapezoidais.....	105
Figura 46	- Corpos de prova trapezoidais em repouso.....	105
Figura 47	- Sinal da amplitude e da flecha.	108
Figura 48	- Captação de dados por múltiplo sequencial.	109
Figura 49	- Corpos de prova na máquina de ensaio.....	110
Figura 50	- Curvas Isotérmicas (MOMM, 1998).....	112
Figura 51	- Curva Equivalência Frequência-Temperatura.....	113
Figura 52	- Curvas Isócronas (MOMM, 1998).....	114
Figura 53	- Espaço de Black (MOMM, 1998).....	115
Figura 54	- Plano Cole-Cole (MOMM, 1998).....	115
Figura 55	- Captação de dados por múltiplo programado.....	117
Figura 56	- Definição do número de ciclos de ruptura	118
Figura 57	- Prensa Marshall.....	122
Figura 58	- Direcionamento dos corpos de prova do ensaio Duriez.....	126
Figura 59	- Usinagem no Laboratório de Pavimentação da UFSC.....	129
Figura 60	- Usinagem no Laboratório de Pavimentação da EPUSP.....	130
Figura 61	- Placas de Deformação Permanente em repouso.....	131
Figura 62	- Pesagem hidrostática das placas de Deformação Permanente.	132
Figura 63	- Deformação Permanente de 2,0% nas placas de	133
Figura 64	- Triagem dos corpos de provas trapezoidais.	134

Figura 65	-	Corpos de prova trapezoidal colados.	135
Figura 66	-	Curvas Isotérmicas do concreto asfáltico convencional.	140
Figura 67	-	Curvas Isotérmicas do concreto asfáltico modificado.	140
Figura 68	-	Curva Equivalência do concreto asfáltico convencional.	142
Figura 69	-	Curva Equivalência do concreto asfáltico modificado.	142
Figura 70	-	Curvas Isócronas do concreto asfáltico convencional.	144
Figura 71	-	Curvas Isócronas do concreto asfáltico modificado. ..	144
Figura 72	-	Espaço de Black do concreto asfáltico convencional.	146
Figura 73	-	Espaço de Black do concreto asfáltico modificado. ...	146
Figura 74	-	Plano Cole-Cole do concreto asfáltico convencional.	148
Figura 75	-	Plano Cole-Cole do concreto asfáltico modificado.....	148
Figura 76	-	Zona de ruptura do corpo de prova.	150
Figura 77	-	Regiões de ruptura do corpo de prova trapezoidal.....	151
Figura 78	-	Curva de Fadiga do concreto asfáltico convencional..	155
Figura 79	-	Curva de Fadiga do concreto asfáltico modificado pelo polímero EVA.....	156
Figura 80	-	Sobreposição das Isotérmicas.	160
Figura 81	-	Sobreposição das curvas Equivalência Frequência-Temperatura.	161
Figura 82	-	Sobreposição das Isócronas.	162
Figura 83	-	Sobreposição das curvas do Espaço de Black.....	163
Figura 84	-	Sobreposição dos Planos Cole-Cole.	164

Figura 85 - Estrutura do pavimento de concreto asfáltico convencional.....	176
Figura 86 - Estrutura do pavimento de concreto asfáltico modificado pelo polímero EVA.	177

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	- Consumo do polímero EVA no Brasil	46
Tabela 2	- Propriedades de controle do polímero EVA HM-728 (BRASKEM, 2010).	47
Tabela 3	- Propriedades típicas do polímero EVA HM-728 (BRASKEM, 2010).	47
Tabela 4	- Valores da granulometria (QUINTERO, 2011).	58
Tabela 5	- Resultado da caracterização do granular.....	59
Tabela 6	- Teor de polímero EVA em outras bibliografias.	61
Tabela 7	- Resultados dos ensaios de caracterização do ligante.....	68
Tabela 8	- Resultados dos ensaios de caracterização do ligante modificado com 5% de polímero EVA.	69
Tabela 9	- Limites para os parâmetros de análise do ensaio Marshall.	78
Tabela 10	- Canais do sistema de aquisição de dados.	89
Tabela 11	- Dimensões dos corpos de prova trapezoidais.....	101
Tabela 12	- Temperaturas de usinagem e compactação.	123
Tabela 13	- Média dos valores do ensaio Marshall.	124
Tabela 14	- Média dos valores do ensaio Marshall.	124
Tabela 15	- Quantidade total de corpos de prova do ensaio Duriez.....	125
Tabela 16	- Massas específicas e teor de vazios do Ensaio Duriez.	126
Tabela 17	- Relação r/R do ensaio Duriez.....	127
Tabela 18	- Resultados do ensaio de Deformação Permanente.....	133
Tabela 19	- Parâmetros para o Módulo Complexo do.....	135
Tabela 20	- Parâmetros para o Módulo Complexo do	

	concreto asfáltico modificado pelo EVA.....	136
Tabela 21	- Resultados do ensaio de Módulo Complexo do.....	136
Tabela 22	- Resultados do ensaio de Módulo Complexo do.....	137
Tabela 23	- Resultados do ensaio de Fadiga do concreto asfáltico convencional.....	152
Tabela 24	- Resultados do ensaio de Fadiga do concreto asfáltico modificado pelo EVA.....	153
Tabela 25	- Coeficientes da regressão estatística.....	154
Tabela 26	- Valores de N e de ε_6	154
Tabela 27	- Valores de módulo a 10°C e 25 Hz por interpolação..	165
Tabela 28	- Resultados dos ensaios de Fadiga e Módulo Complexo.....	170
Tabela 29	- Parâmetros de dimensionamento.	171
Tabela 30	- Classes de tráfego (SETRA-LCPC, 1997).....	171
Tabela 31	- Valores dos coeficientes e as deformações admissíveis.....	174
Tabela 32	- Classe de capacidade da plataforma (sub-leito).....	174
Tabela 33	- Parâmetros Huet-Sayegh.....	175
Tabela 34	- Espessuras dos pavimentos do concreto convencional.	175
Tabela 35	- Espessuras dos pavimentos do concreto modificado pelo polímero EVA.....	176
Tabela 36	- Deformações calculadas e admissíveis.	178

LISTA DE ABREVIACÕES E SIGLAS

ABIPLAST	-	Associação Brasileira da Indústria de Plásticos
ASTM	-	<i>American Society for Testing and Materials</i>
BGS	-	brita graduada simples
CAP	-	Cimento Asfáltico de Petróleo
CAP EVA	-	CAP modificado pelo EVA
CAPES	-	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
DNER	-	Departamento de Estradas de Rodagem
DNIT	-	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
EM	-	Especificação de Material
ES	-	Especificação de Serviço
EVA	-	Etileno Acetato de Vinila
HM	-	<i>hot melt</i>
IBP	-	Instituto Brasileiro de Petróleo, Gás e Biocombustíveis
LCPC	-	<i>Laboratoire Central des Ponts et Chaussées</i>
LTP/EPUSP	-	Laboratório de Tecnologia em Pavimentação da Universidade de São Paulo
LVDT	-	<i>Linear Diferencial Transformer</i>
ME	-	Método de Ensaio
NBR	-	Norma Brasileira
NF	-	Norma Francesa
PCG	-	Prensa de Compactação por Cisalhamento Giratório
PPGEC	-	Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil
REPAR	-	Refinaria Presidente Getúlio Vargas (Refinaria do Paraná)
SARA	-	Saturadas, Aromáticos, Resinas e Asfaltenos
SBR	-	Estireno Butadieno Randômico
SBS	-	Estireno Butadieno Estireno
SETRA	-	<i>Service d'Études Techniques des Routes et Autoroutes</i>
TGA	-	Termogravimetria
UFSC	-	Universidade Federal de Santa Catarina
USP	-	Universidade de São Paulo

LISTA DE SÍMBOLOS

#	-	peneira
$\Delta\epsilon_6$	-	variação do épsilon 6
μ	-	coeficiente de viscosidade
A	-	amplitude do deslocamento
A'	-	área da seção transversal
A''	-	profundidade da deformação a 1.000 ciclos
ADM	-	media diária anual
cP	-	<i>centipoise</i> (unidade do ensaio Brookfield)
CAM	-	coeficiente de agressividade
dmáx	-	diâmetro máximo
E(10°C)	-	módulo complexo a 10°C
E(θ_{eq})	-	módulo complexo à temperatura equivalente
E*	-	módulo complexo
E ₁	-	módulo elástico real
E ₂	-	módulo imaginário
K _{ϵ}	-	coeficiente dimensões do corpo de prova
K _{σ}	-	coeficiente dimensões do corpo de prova
mbar	-	milésimo de bar
MGS	-	massa de granulares secos
mmHg	-	milímetro de mercúrio
MPa	-	megapascal
MVA	-	massa volumétrica aparente
MVhid	-	massa volumétrica hidrostática
MVR	-	massa volumétrica real
MVR _g	-	massa volumétrica real dos granulares
N	-	tráfego acumulado por faixa
NE	-	número de eixos equivalentes
RBV	-	relação betume-vazios
rpm	-	rotações por segundo
SH	-	dispersão sobre a espessura da camada
SN	-	desvio-padrão dos resíduos
TL _{int}	-	teor de ligante asfáltico interno
T _R	-	temperatura de referência
u	-	variável associada ao risco
VAM	-	vazios do agregado mineral
γ	-	fator de forma
δ	-	desvio-padrão da distribuição
ϵ	-	deformação

ε_6	-	deformação épsilon 6
$\varepsilon_{\text{máx}}$	-	deformação máxima escolhida pelo projetista
$\varepsilon_{z,\text{adm}}$	-	deformação admissível no topo do subleito
μ	-	fator de massa
μ_{def}	-	microdeformação
μm	-	micrômetro
$\rho_{\text{água}}$	-	massa específica água
σ^*	-	valores complexos de tensão
ε^*	-	valores complexos de deformação
τ	-	taxa de crescimento anual
φ	-	ângulo de fase ou defasagem
ω	-	pulsação do sinal
σ	-	tensão

RESUMO

O objetivo desta pesquisa é estudar o comportamento do concreto asfáltico alterando as características originais por meio da sua modificação pelo polímero EVA (etileno acetato de vinila). Ensaios laboratoriais da metodologia francesa são realizados para formular um concreto asfáltico que seja capaz de resistir ao tráfego de maneira satisfatória, garantindo a qualidade do material ao longo da vida útil na estrutura de pavimento em que será aplicado. Nesse estudo foram utilizados dois tipos de ligantes asfálticos, sendo um ligante 50/70 convencional e um ligante 50/70 modificado com o copolímero EVA. Foram realizados ensaios de caracterização dos materiais, além dos ensaios Marshall, Duriez, Deformação Permanente, compreendendo ainda os ensaios fundamentais de Módulo Complexo e de Fadiga. Com a análise dos resultados desses ensaios pode-se concluir que o polímero EVA melhorou as características do concreto asfáltico. A eficácia do polímero foi constatado nos ensaios de Duriez (menor perda de resistência devido à ação da água), no ensaio de Deformação Permanente (maior resistência às solicitações de tráfego) e no ensaio de Fadiga (deformação admissível maior que o concreto asfáltico convencional). É feito um dimensionamento simulado onde demonstra que o uso do ligante modificado pelo polímero EVA faz com que diminua em dois centímetros a camada asfáltica. Em se tratando de obras de pavimentação, que se estendem por quilômetros, essa pequena espessura faz com que reduza os custos de uma obra rodoviária e aumente a vida útil do pavimento, visto que o concreto asfáltico modificado possui uma resistência maior à deformação permanente e à fadiga do que os concretos asfálticos convencionais.

Palavras-chave: concreto asfáltico, polímero EVA, módulo complexo, fadiga.

ABSTRACT

The objective of this research is to study the behavior of asphalt concrete by altering its original characteristics through its modification by the EVA polymer (ethylene vinyl acetate). Laboratory tests applying the French methodology have been performed to produce an asphalt concrete, which is designed to resist traffic loads in a satisfactory manner, ensuring the quality of the material throughout the life of the flooring structure that will be applied. In this case, we have used two types of asphalt binders: a conventional 50/70 binder and a 50/70 binder with a modified EVA copolymer. Tests have been performed to characterise the material in addition to the Marshall test, Duriez test, Permanent Deformation test, comprising also the key tests such as Module Complex and Fatigue. Through the tests result analysis we concluded that the EVA polymer provided an improvement on the asphalt concrete characteristics. The polymer effectiveness was identified Duriez test (resistance loss due the water's action), Permanent Deformation test (high resistance on traffic requests) and Fatigue test (admissible deformation higher than conventional asphaltic concrete). A structure simulation was carried out in which demonstrates the use of asphalt binder with a modified EVA copolymer resulting in two less centimeters of asphalt layer. In the case of pavement, which are extents, this small thickness reduced road work expenditures and increased the pavement life cycle. We concluded that the modified asphalt concrete has a higher resistance than conventional asphalt concrete in relation to permanent deformation and fatigue.

Key-words: asphalt concrete, EVA polymer, complex modulus, fatigue.

CAPÍTULO 1

1 - INTRODUÇÃO

1.1 - CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O asfalto é um dos materiais mais antigos utilizados pelo homem. Foi detectado o uso na Mesopotâmia, em assentamentos de alvenarias, na vedação de embarcações e também na construção de estradas. Há relatos de que os egípcios empregavam o asfalto no processo de mumificação segundo o Instituto Brasileiro de Petróleo, Gás e Biocombustíveis – IBP (1999).

O pioneirismo do emprego do asfalto na pavimentação data de 1802 na França, em 1838 nos Estados Unidos e em 1869 na Inglaterra. Os asfaltos utilizados no passado eram de origem natural, ou seja, asfaltos extraídos diretamente de afloramentos naturais existentes na superfície terrestre (LEITE, 1999).

O Brasil possui entre municipais, estaduais e federais 1.712.477 km de vias pavimentadas e não pavimentadas, segundo dados do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes – DNIT (2012). As estradas não pavimentadas são a maioria, sendo 87,5% de estradas de terra e apenas 12,5% de rodovias pavimentadas, como mostra a Figura 1.

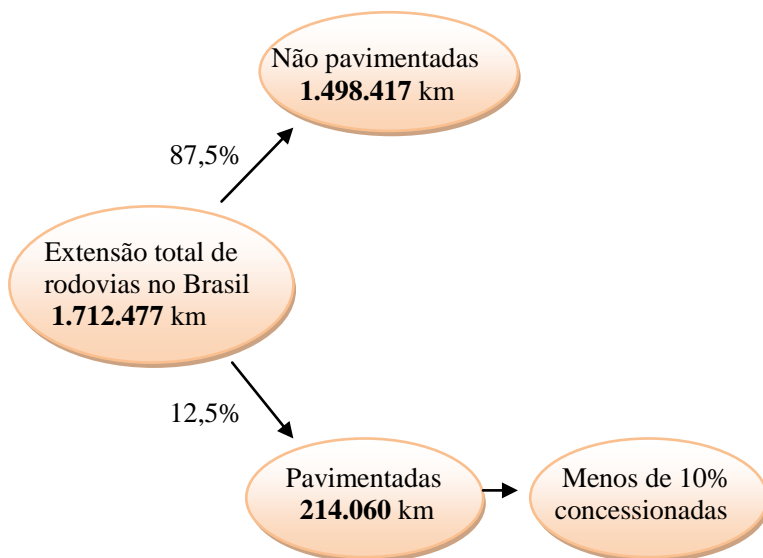


Figura 1 - Estradas brasileiras em números (DNIT, 2012).

Menos de 10% das rodovias brasileiras são concessionadas por empresas privadas. Essas rodovias são consideradas melhores que as demais por possuírem um sistema de manutenção e fiscalização com maior frequência. Grande parte das cargas nacionais é transportada via rodovia e apresentam, em sua maioria, estado de conservação precária. O volume de recursos destinados aos orçamentos para a construção, reconstrução e manutenção dessas rodovias é insuficiente.

Cada vez mais faz-se necessário investimentos em estudos na área de infraestrutura viária para a melhoria das estradas. Com o avanço tecnológico em variados setores da economia não seria diferente na pavimentação asfáltica, porém, pouco é utilizado no Brasil. O fato do país não usufruir das novas tecnologias rodoviárias deve-se a diversos fatores tais como o elevado custo, a difícil trabalhabilidade de alguns materiais ou também por descaso/desconhecimento por parte dos técnicos e órgãos normativos. Isso faz com que seja importante o estudo e divulgação das tecnologias existentes para melhorar a durabilidade das estruturas de pavimento.

O cimento asfáltico de petróleo (CAP) é um dos elementos essenciais na concepção de um pavimento flexíveis e apresenta-se na forma viscosa a altas temperaturas e torna-se elástico a baixas

temperaturas. A fluência dos materiais viscoelásticos podem causar defeitos ao pavimento como a deformação permanente e trincas por fadiga (YU *et al*, 2007). Em função desses defeitos, reconhece-se que as propriedades do asfalto convencional podem ser modificadas por outros materiais, como os polímeros e fíleres.

Uma das tecnologias utilizadas no Brasil para melhoria da pavimentação asfáltica é a modificação do ligante convencional por polímeros. Entre os polímeros mais utilizados atualmente estão o SBS (estireno butadieno estireno), o SBR (estireno butadieno randômico) e o EVA (etileno acetato de vinila). A modificação do polímero EVA nos concretos asfálticos já é uma tecnologia conhecida, porém existem características dessa modificação que ainda são questionáveis. Há carência nos estudos sobre o comportamento viscoelástico desse material.

Alguns autores como BRINGEL *et al* (2005), ALENCAR *et al* (2009), FROTA e D'ANTONA (2011) estudaram o EVA e obtiveram resultados melhores se comparados ao ligante convencional. Porém, mesmo com resultados satisfatórios de alguns ensaios, a comunidade científica ainda é cética em relação às propriedades do polímero EVA.

A eficiência da modificação do concreto asfáltico pelo polímero ainda é questionada, pois os resultados dos ensaios são mais dispersos se comparados com outros polímeros. Existem variáveis na modificação que ainda não foram desvendadas, por isso é necessário um estudo aprofundado das propriedades desse concreto asfáltico e uma análise do comportamento do pavimento. Os ensaios fundamentais de Módulo Complexo e de Fadiga são tecnologias avançadas que podem auxiliar no entendimento do comportamento mecânico dos concretos asfálticos modificados pelo polímero EVA.

1.2 - OBJETIVO GERAL

O objetivo geral deste trabalho é formular as misturas asfálticas segundo a metodologia francesa e estudar o comportamento dos concretos asfálticos modificados pelo polímero EVA no domínio viscoelástico nos ensaios de Módulo Complexo e da Fadiga. São utilizados os ligantes 50/70 convencional e 50/70 modificado pelo EVA a fim de compará-los em relação às propriedades mecânicas de rigidez e à deformação admissível.

1.3 - OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos são:

- a) Estudar e caracterizar os materiais e definir uma curva granulométrica;
- b) Formular dois concretos asfálticos, sendo um com ligante 50/70 convencional e outro com ligante 50/70 modificado pelo polímero EVA;
- c) Definir um teor ótimo de ligante através do ensaio da PCG (NF 98-252, 1999). Caso não seja possível, será definido pela dosagem Marshall (DNER-ME 043, 1995). São ensaiados nove teores de ligante para cada concreto asfáltico (4,0%; 4,25%; 4,5%; 4,75%; 5,0%; 5,25%; 5,5%; 5,75% e 6,0%);
- d) Formular concretos asfálticos de acordo com os princípios normativos da metodologia francesa, iniciando com a avaliação da sensibilidade à água através do ensaio Duriez (NF 98-251-1, 1995);
- e) Verificar a resistência dos dois concretos asfálticos quanto ao afundamento nas trilhas de roda no ensaio de Deformação Permanente (NF 98-253-1, 1993);
- f) Ensaiai as propriedades mecânicas de rigidez dos concretos asfálticos no Módulo Complexo (NF 12697-26, 2004);
- g) Ensaiai a deformação admissível no ensaio de Fadiga (NF 12697-24+A1, 2007);
- h) Explorar os resultados dos ensaios, por meio da avaliação do desempenho mecânico dos concretos asfálticos;
- i) Validar a eficiência do polímero EVA no aumento da resistência do concreto asfáltico em relação ao concreto convencional;
- j) Com os dados do ensaio de Módulo Complexo e da Fadiga, fazer uma simulação de um dimensionamento de pavimento.

A seguir, na Figura 2 apresenta-se a sequência de ensaios para atingir o objetivo desta pesquisa.

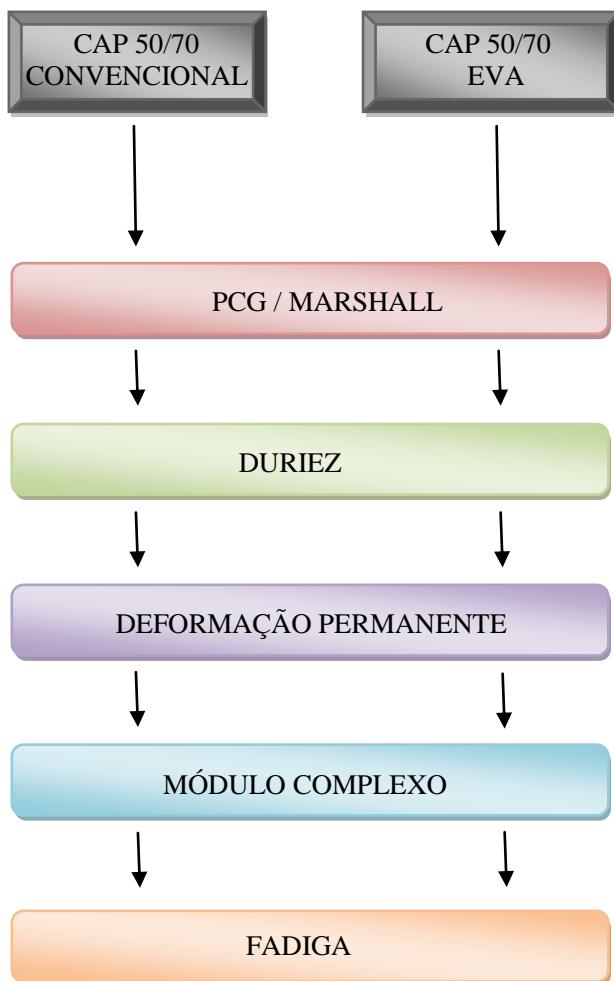


Figura 2 - Sequência de ensaios.

1.4 - LIMITAÇÕES DO ESPAÇO DA PESQUISA

A realização da pesquisa limita-se aos ensaios em laboratório, sendo que nenhum ensaio foi realizado em campo.

Para uma melhor homogeneidade seria recomendável utilizar o polímero EVA em formato de pó ou líquido, mas os polímeros utilizados nesta pesquisa encontram-se em formato de *pellets* (pequenos grãos ovais). O polímero em pó e líquido somente é encontrado no exterior.

A modificação do ligante asfáltico não foi feita exatamente a 150°C (temperatura recomendada pelo fabricante do polímero) devido à imprecisão do equipamento de mistura. O termômetro oscilou entre 140 e 160°C.

Geralmente são adicionados outros materiais ao ligante asfáltico para que os resultados dos ensaios de caracterização melhorem, porém para esta pesquisa nada é adicionado além do polímero EVA. Deste modo, as variáveis dos resultados obtidos resumem-se apenas ao polímero.

1.5 - JUSTIFICATIVAS PARA O TEMA PROPOSTO

Uma das formas de melhorar um concreto asfáltico é modificá-lo com polímero. A modificação imprime características que tendem a atender as exigências de um bom pavimento.

Outra motivação para o estudo da incorporação do EVA ao asfalto vem da possibilidade da utilização dos resíduos de EVA gerado por algumas indústrias calçadistas. A indústria obtém vantagens ao destinar seus resíduos para a reciclagem, ao mesmo tempo em que se resolve uma questão ambiental.

Há a dificuldade em estudar o comportamento do concreto asfáltico por se tratar de um material viscoelástico. Ensaio com os mesmos procedimentos e mesmos materiais podem gerar resultados diferentes devido à variação constante das suas propriedades. A repetibilidade dos ensaios sobre concretos asfálticos pode-se chegar, não a resultados exatos mas, a resultados com uma maior confiabilidade.

O estudo do comportamento mecânico do concreto asfáltico no domínio viscoelástico determina os parâmetros do material para um correto dimensionamento do pavimento. O interesse maior pela proposta

dessa dissertação é devido aos poucos estudos com ensaios a níveis fundamentais (Módulo Complexo e Fadiga) em concretos asfálticos modificados por polímero EVA. Existem estudos com a adição desse polímero, mas poucos são postos à prova aos ensaios mais exigentes e necessários para a construção de um bom pavimento. O intuito é conhecer o comportamento do material no domínio frequencial e da temperatura. A melhoria na formulação dos concretos asfálticos faz com que o comportamento mecânico do pavimento garanta a segurança e o conforto ao usuário.

1.6 - ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Esta dissertação está organizada em sete capítulos descritos, resumidamente, abaixo:

Capítulo 1 - No primeiro capítulo é feito a introdução do trabalho contendo as considerações iniciais, o objetivo geral, os objetivos específicos, as limitações do espaço da pesquisa e as justificativas para o tema proposto. Nesse capítulo estão as principais informações sobre a dissertação.

Capítulo 2 - No segundo capítulo é abordada uma revisão bibliográfica sobre ligante asfáltico convencional, o polímero EVA e a modificação do ligante asfáltico pelo polímero.

Capítulo 3 - No terceiro capítulo são evidenciados os materiais utilizados e a metodologia de modificação dos concretos asfálticos convencionais pelo polímero EVA. Nesse capítulo encontram-se os ensaios de caracterização dos ligantes.

Capítulo 4 - No quarto capítulo encontra-se a metodologia dos ensaios e a preparação dos concretos asfálticos. São descritos os ensaios da PCG e dosagem Marshall, ensaio Duriez, ensaio de Deformação Permanente, ensaio de Módulo Complexo e o ensaio de Fadiga. O sistema de aquisição de dados é apresentado nesse capítulo contendo as informações para aferir a máquina de ensaio.

Capítulo 5 - No quinto capítulo são explorados e analisados os resultados obtidos nos ensaios Marshall, Duriez, Deformação Permanente, Módulo Complexo e Fadiga.

Capítulo 6 - No sexto capítulo é realizado um exemplo de dimensionamento de pavimento.

Capítulo 7 - No sétimo capítulo encontram-se a conclusão do trabalho e as recomendações para estudos futuros.

CAPÍTULO 2

2 - LIGANTE ASFÁLTICO MODIFICADO PELO POLÍMERO EVA

2.1 - O LIGANTE ASFÁLTICO

A penetração de um ligante asfáltico é definida como a distância em décimos de milímetros que uma agulha padronizada penetra verticalmente em uma amostra de cimento asfáltico, sob condições especificadas de carga, tempo e temperatura, ou seja, 100g, 5s e 25°C (IBP, 1999; DNIT 095-EM, 2006). Para um ligante asfáltico 50/70 a agulha penetra entre 5,0mm = 50 (1/10mm) e 7,0mm = 70 (1/10mm). Quanto menor a penetração, “mais duro” é o cimento asfáltico. São especificados quatro tipos de ligante asfáltico pela sua penetração: CAP 30/45, CAP 50/70, CAP 85/100 e CAP 150/200. Já a classificação pela viscosidade absoluta a 60°C, contempla três tipos (em poises): CAP 7, CAP 20 e CAP 40.

O ligante asfáltico é obtido por destilação fracionada do petróleo e a sua composição depende do lugar de ocorrência de sedimentação do material orgânico e minerais que foram depositados na forma de estratos. Ao ser submetido a pressões litostáticas, forma-se um produto de compostos hidrocarbonetos que são fracionados em quatro classes químicas denominadas de frações SARA: saturadas, aromáticos, resinas e asfaltenos que englobam os alifáticos e naftênicos. A matriz dos maltenos (parte volátil do ligante asfáltico) é constituída pelas frações saturadas, aromáticas e pelas resinas. Os asfaltenos são a parte rígida que determina a estrutura do ligante asfáltico (MAILLARD, 2005).

Quando o ligante asfáltico é utilizado na pavimentação, apresenta um comportamento viscoelástico o que possibilita o manuseio a quente (BRINGEL *et al*, 2005). Em temperaturas muito baixas a viscosidade mostra-se muito elevada e se comporta aproximadamente como um sólido e à medida que a temperatura aumenta baixa a viscosidade, e se apresenta como um líquido, sendo essa transição reversível por simples resfriamento. O ligante asfáltico tem na viscoelasticidade a base do comportamento mecânico que exerce sobre a estrutura do pavimento (BERNUCCI *et al*, 2007).

A caracterização de materiais de pavimentação (ligante asfáltico, agregados, concretos asfálticos) é uma tarefa complexa em virtude das propriedades dos materiais dependerem de diversos fatores como o meio ambiente, estado de tensões e o tempo de aplicação e frequência das cargas dos veículos. Diante disso, a caracterização dos concretos asfálticos requer um balanço apropriado entre rigor e praticidade, uma vez que nem todas as variáveis podem ser consideradas simultaneamente, pelo menos não no estágio atual de conhecimento (BERNUCCI *et al*, 2007).

Os resultados da análise estrutural dos pavimentos (tensões, deformações e deslocamentos) são comparados com critérios de dimensionamento predefinidos de modo a evitar os principais tipos de defeitos, principalmente trincamento por fadiga e deformação permanente (MOTTA, 1991). Deformação permanente é um defeito caracterizado por uma seção transversal que não está em sua posição original. É chamada de permanente, pois, representa um acúmulo de pequenas parcelas de deformação que ocorrem a cada carregamento. Esta deformação não pode ser recuperada e ocorre, geralmente, a altas temperaturas nos primeiros anos de vida do pavimento (BRINGEL *et al*, 2005).

O trincamento por fadiga é um problema decorrente da repetição pela aplicação de cargas pesadas e ocorre a temperaturas intermediárias. As trincas a baixa temperatura, por exemplo, surgem quando uma camada betuminosa se contrai em clima frio. A Figura 3 ilustra os principais defeitos encontrados nos pavimentos asfálticos.

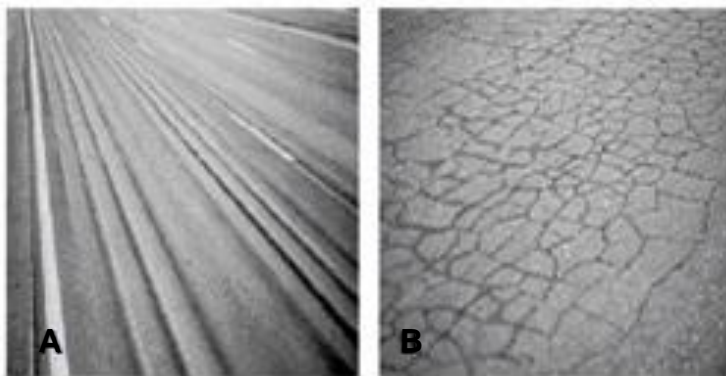


Figura 3 - Defeitos nos pavimentos: (A) Deformação permanente e (B) trincas por fadiga (BRINGEL *et al*, 2005).

O revestimento asfáltico convencional não tem dado uma resposta satisfatória quando se impõe condições mais agressivas de tráfego. Os polímeros são materiais dependentes da temperatura e o conhecimento de sua estrutura é essencial para o entendimento de sua capacidade de resistir aos esforços durante a vida de serviço (LEITE, 1999).

Na busca por novas alternativas para melhoria do produto, pesquisadores têm estudado a incorporação de polímeros ao asfalto devido à necessidade de aumentar a vida útil dos pavimentos submetidos a volumes de tráfego de crescente magnitude. É necessário o emprego de concretos asfálticos com desempenho elevado e uma solução que tem sido adotada nas últimas décadas é a modificação de ligantes convencionais através da incorporação de polímeros, resultando em aumento na resistência à fadiga e redução de deformações permanentes (ROHDE, 2007).

Tem sido observado que a modificação dá uma qualidade superior ao produto final. O polímero melhora o comportamento elástico do asfalto e contribui para a sua resistência à deformação permanente e às trincas por fadiga. Contribui, também, para uma adesão entre agregados e asfalto, além de melhorar a resistência à oxidação (BRINGEL *et al*, 2005).

O etileno acetato de vinila (EVA) está entre os polímeros mais utilizados atualmente para a modificação dos concretos asfálticos. No Brasil, a concessionária AUTOBAN já realizou testes e utiliza o

concreto asfáltico modificado pelo EVA em muitos trechos da rodovia SP-330.

2.2 - POLÍMERO ETILENO ACETATO DE VINILA (EVA)

Um polímero é uma macromolécula formada pela repetição de pequenas e simples unidades químicas (monômeros), ligadas covalentemente. Ele pode ser dividido em homopolímeros ou copolímeros. O EVA é chamado de copolímero porque são empregadas espécies diferentes de monômeros (etileno + acetato de vinila). O polímero EVA apresenta segmentos de etileno randômicos, que são semi-cristalinos, enquanto os que contêm os grupos acetato constituem a fase amorfa (não possuem estrutura atômica definida), como demonstrado na Figura 4 (NEGRÃO, 2006).

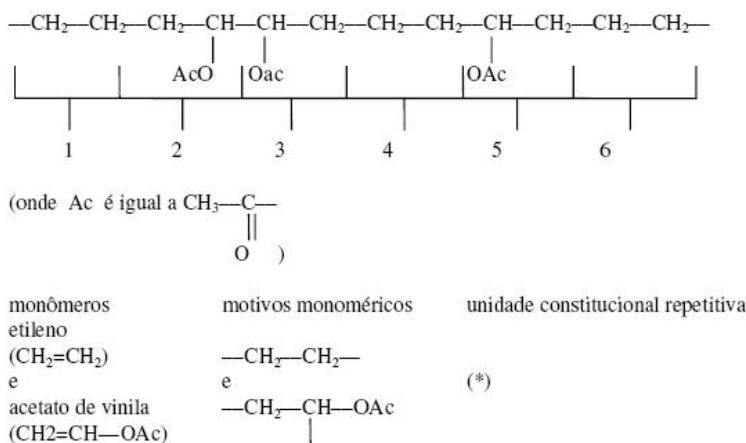


Figura 4 - Conformação planar das moléculas de EVA
(NEGRÃO, 2006).

No mercado mundial a cada ano o uso de polímeros aumenta segundo a Associação Brasileira da Indústria de Plásticos - ABIPLAST (2010). São os Estados Unidos que detém a maior porcentagem em peso de importação do polímero EVA, conforme demonstrado na Figura 5.

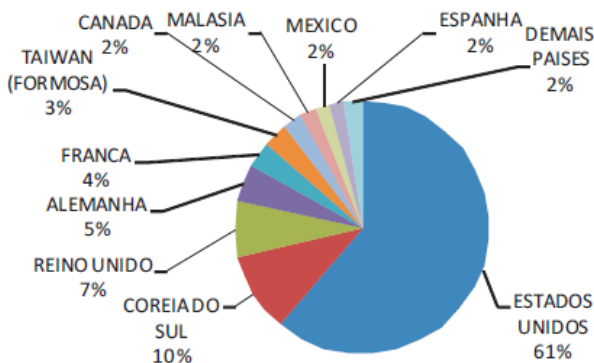


Figura 5 - Importações do polímero EVA em 2009 (ABIPLAST, 2010).

Já as maiores exportações ficam a cargo de países da Ásia, como a Índia e a China, que detém quase metade de todo o EVA exportado. Na América do Sul destaca-se a Argentina como o terceiro maior exportador com 17% do mercado internacional, como mostra a Figura 6.

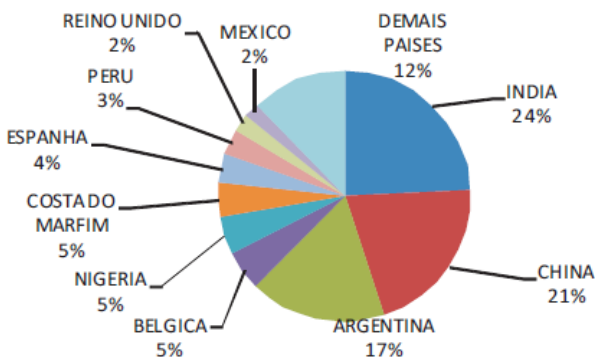


Figura 6 - Exportações do polímero EVA em 2009 (ABIPLAST, 2010).

Segundo o último relatório da ABIPLAST, em 2009 o consumo de resinas termoplásticas no Brasil foi da ordem de 5,6 milhões de toneladas. O polipropileno representou a maior porcentagem deste

montante com cerca de 30% (1,6 milhões de toneladas) e o copolímero EVA apenas com 1% (56 mil toneladas). A explicação para esse baixo consumo deve-se à aplicação muito específica do EVA e também devido ao custo ainda ser alto em relação aos demais polímeros. Os EVAs são os chamados “plásticos de engenharia”. Mesmo com uma representatividade baixa em relação às demais resinas, o polímero EVA torna-se importante ao observar o aumento do consumo a cada ano no país, conforme mostra a Tabela 1.

Tabela 1 - Consumo do polímero EVA no Brasil
(ABIPLAST, 2010).

ANO	TONELADAS
1985	8.142
1999	39.103
2003	45.780
2009	55.580

O polímero EVA é um copolímero cuja composição pode variar de uns poucos por cento de acetato até cerca de 50%. De acordo com esta proporção, as propriedades variam de um plastômero muito semelhante ao polietileno, de baixa densidade, até um elastômero. Os plastômeros e elastômero são polímeros naturais ou sintéticos, sendo a classificação estabelecida em função da capacidade de deformação sob ação de forças externas. Elastômeros são materiais com alongamento de ruptura muito elevado, da ordem de 400% (família dos termoplásticos com cadeias lineares). Plastômeros apresentam menor alongamento, na ordem de 70 a 100%, sendo normalmente constituídos por cadeias cruzadas ou ramificadas.

No copolímero EVA a redução do teor de acetato de vinila acarreta aumento da cristalinidade e, em consequência, no módulo de rigidez, aumento nas temperaturas de amolecimento e diminuição da temperatura de fragilidade (BRULÉ; BOURLOT, 1993).

Existem aproximadamente onze tipos de polímeros EVA no Brasil, cada qual com diferentes finalidades no comércio (calçados, vedantes de tampa de bebidas carbonatadas, embalagens para alimentos refrigerados, brinquedos etc). O melhor tipo de EVA a ser utilizado, segundo o fornecedor do polímero (BRASKEM, 2010), para modificar

um ligante asfáltico é o HM-728 com teor de 28% de acetato de vinila. Esse polímero é considerado um elastômero. Na Tabela 2 e na Tabela 3 encontram-se as características do EVA HM-728.

Tabela 2 - Propriedades de controle do polímero EVA HM-728 (BRASKEM, 2010).

	MÉTODO ASTM	UNIDADE	VALOR
Índice de fluidez	D 1238	g/10 min	6,0
Teor acetato de vinila	Braskem	%	28,0

Tabela 3 - Propriedades típicas do polímero EVA HM-728 (BRASKEM, 2010).

	MÉTODO ASTM	UNIDADE	VALOR
Densidade	D 1505	g/cm ³	0,95
Resistência à quebra	D 1693	h/F50	>300
Dureza	D 2240	Shore A/D	80/25
Ponto de fusão	D 3418	°C	77
Pto de amolecimento	D 1525	°C	49

Todas as descrições, aplicações e propriedades do polímero EVA encontram-se no Anexo 1.

A decomposição do EVA (em *pellets* e aparas) foi estudada por termogravimetria (TGA), apresentando estabilidade térmica até 300°C conforme a Figura 7. Termogravimetria é a técnica na qual a mudança da massa de uma substância é medida, em função da temperatura, enquanto esta é submetida a uma programação controlada (ALLEN *et al*, 2000).

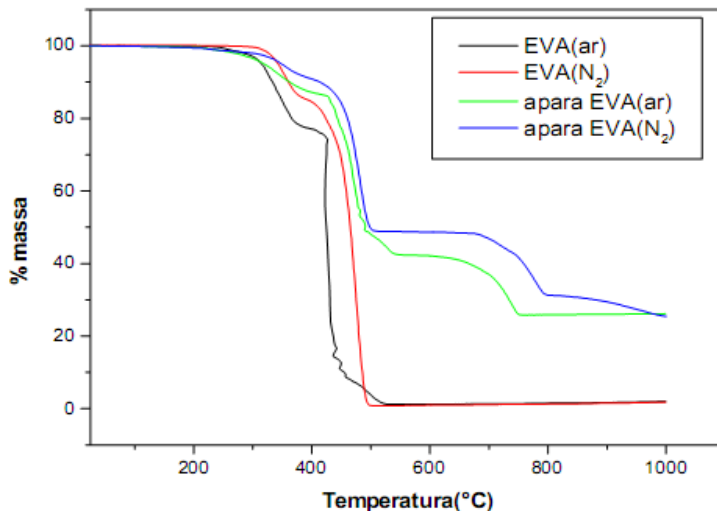


Figura 7 - Curvas termogravimétricas do EVA em atmosfera de ar e N₂ (ALLEN *et al*, 2000).

Observou-se um evento em torno de 300°C que é atribuído à formação de ácido acético (produto da decomposição) e outro evento em torno de 400°C, referente à degradação da cadeia principal do copolímero.

As propriedades do ligante asfáltico são modificadas na presença do polímero EVA, verificando-se um aumento da viscosidade e uma melhora no grau do desempenho do ligante asfáltico. Os resultados dos ensaios de viscosidade são apresentados na Figura 8.

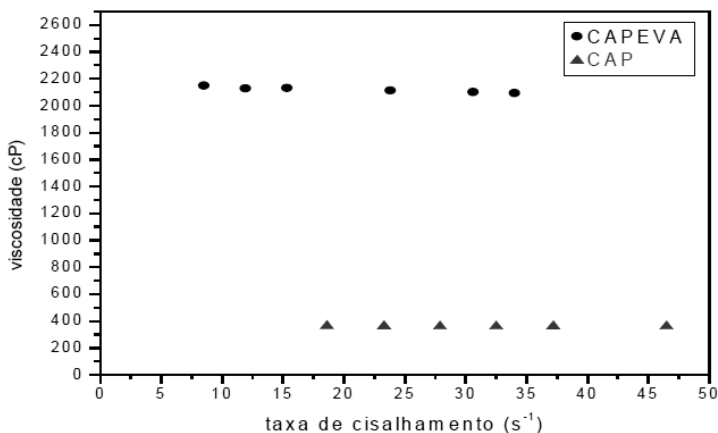


Figura 8 - Viscosidade do CAP EVA e CAP convencional (BRINGEL *et al*, 2005).

A alta viscosidade apresentada pelo ligante asfáltico modificado (CAP EVA) deve-se, naturalmente, a presença do polímero. O EVA, devido a sua natureza alifática (em virtude da existência de sequências etilênicas de elevado peso molecular), solubilizou-se nas frações saturadas do asfalto, modificando o escoamento do material. O comportamento de fluido newtoniano é verificado tanto para o ligante asfáltico convencional como para a nova mistura, nas condições estudadas. No líquido viscoso ideal segundo a lei de Newton, a relação tensão cisalhante aplicada à taxa de deformação é linear constante denominada coeficiente de viscosidade (μ). Os ligantes asfálticos se comportam como fluidos newtonianos a temperaturas próximas de 100°C (BRINGEL *et al*, 2005).

Em estudos similares, FROTA (2011) também chegou ao resultado de que o ligante asfáltico modificado exibiu maior viscosidade, ou seja, maior resistência ao fluxo para as mesmas temperaturas que o asfalto convencional. Tais resultados são indicativos de maior consistência e, portanto, menor suscetibilidade à deformação permanente. O mesmo foi delineado ao longo dos ensaios de Deformação Permanente e Fadiga obtendo um menor ângulo de fase que o ligante asfáltico convencional, sugerindo superioridade quanto à elasticidade, resultando em uma maior resistência à deformação.

Pode-se dizer que a viscosidade aumenta quando se modifica o concreto asfáltico convencional com outros polímeros ou com borracha e não somente com EVA. A porcentagem de borracha possui influência na viscosidade, havendo um aumento significativo da viscosidade com o aumento da porcentagem de borracha (THIVES, 2009). A viscosidade intrínseca é uma medida da contribuição individual das moléculas do polímero e da borracha à viscosidade do concreto asfáltico (LEITE, 1999).

A comparação com resíduo de EVA da indústria calçadista e polímero EVA em estado puro foi estudada por ZATTERA (2005), também, utilizando termogravimetria. Análises das propriedades mecânicas do resíduo de EVA demonstraram que o material apresenta maior rigidez quando comparado ao EVA puro, com maiores valores de módulo elástico e de dureza. O custo energético da moagem do resíduo de EVA foi calculado e apresentou um custo de 5% menor que o custo do EVA puro. Com isso, a vantagem de utilizar o polímero EVA enaltece, pois se cria uma solução para os problemas ambientais de resíduos da indústria de calçados com o propósito de reciclagem mecânica deste material.

Com o intuito de formular novas misturas para o concreto asfáltico e preocupando-se também com questões sociais e ambientais, cresce a relevância de expandir o uso do polímero EVA na comunidade científica. Segundo FREITAS (1996) o EVA como modificador de ligante asfáltico é muito utilizado em alguns países, destacando-se, por exemplo, a França e Espanha.

BRINGEL *et al* (2005) e ILDEFONSO (2007) citam as principais vantagens de modificar o ligante asfáltico pelo polímero EVA como o aumento à resistência à deformação permanente, diminuição da susceptibilidade à temperatura e combate aos efeitos da fadiga no pavimento.

LEITE (1999) e BRINGEL *et al* (2005) relatam que estudos relacionados à incorporação do EVA ao ligante asfáltico indicam aumento da viscosidade e melhora no grau do desempenho do material betuminoso devido, em parte, à capacidade de solubilização do EVA nas frações saturadas do asfalto. Por outro lado os ensaios de envelhecimento acelerado mostraram que a presença do EVA reduz o processo de decomposição oxidativa do asfalto.

BRINGEL *et al* (2005) e RODRIGUES *et al* (2009) concluíram que a utilização de ligantes modificados com polímeros confere ao concreto uma alta elasticidade, coesão e durabilidade, aumentando a

resistência dos agregados ao arranque, sob a ação dos esforços tangenciais gerados pelas condições de tráfego ao longo da sua vida útil.

A seguir encontram-se as vantagens do concreto asfáltico modificado pelo polímero EVA:

- ♦ São mais flexíveis que os concretos asfálticos convencionais em virtude da maior concentração de elastômero. O polímero EVA HM-728 é um elastômero com alongamento de ruptura elevado em relação ao concreto convencional;
- ♦ Aumento da viscosidade com a modificação pelo polímero EVA;
- ♦ Possui uma recuperação elástica capaz de melhorar o desempenho dos concretos asfálticos quanto à fadiga e à deformação permanente;
- ♦ Aumento da temperatura do ponto de amolecimento em relação ao ligante convencional;
- ♦ Diminuição do valor de penetração em relação ao ligante convencional;
- ♦ Estabilidade térmica até 300°C;
- ♦ O polímero EVA tem a vantagem sobre o polímero SBS por possuir uma melhor solubilidade no momento da modificação;
- ♦ Suportam condições mais agressivas de tráfego em relação à deformação permanente;
- ♦ Maior resistência à propagação de trincas e a formação de trilhas de roda;
- ♦ Reduzem os custos de manutenção de pavimentos por suportarem uma maior solicitação de carga;
- ♦ Permite a redução da espessura do pavimento;
- ♦ Aumento da vida útil do pavimento;
- ♦ Apesar do concreto asfáltico modificado ser mais caro que o convencional, esse fator é compensado pela melhoria das propriedades.

A seguir encontram-se algumas desvantagens do concreto asfáltico modificado pelo polímero EVA:

- ♦ Com o aumento da viscosidade pode ocorrer problemas durante a usinagem, na estocagem e na aplicação em campo durante o bombeamento;

- ♦ O concreto asfáltico modificado chega, em média, a ser 20% mais caro que os concretos convencionais. Esse ainda é um fator que distancia as concessionárias e órgãos do governo a investirem em modificação com polímeros;
- ♦ A utilização dos ligantes modificados no mundo não chega a 15% dos ligantes rodoviários;
- ♦ O polímero EVA apesar de ser um dos mais indicados para modificação de concreto asfáltico, ainda não se fixou no mercado rodoviário como o SBS. Surgem algumas incertezas quanto a sua eficiência devido à falta de pesquisas no assunto.

Atualmente não existe uma norma de metodologia para a produção de ligante asfáltico modificado com o polímero EVA. É patente que cada país trata os processos envolvidos de maneira peculiar, em função das diversas variáveis como materiais, clima, processos executivos, custos etc. Assim, o asfalto modificado pelo EVA no Brasil é realizado com base nas experiências acumuladas e ao desenvolvimento de materiais que atendam as condições específicas para a produção do concreto asfáltico.

O problema de compatibilidade entre o tipo de polímero modificador e o ligante convencional, que é o componente predominante no produto asfalto-polímero, foi estudado por TAKATU (2004). Essa compatibilidade é mencionada também no relatório do DNER (1998).

A característica de compatibilidade ou estabilidade de um ligante modificado requer que o ligante base utilizado como matéria-prima possua uma relação asfaltenos/aromáticos dentro de uma determinada faixa. Se o ligante base não possuir esta compatibilidade com o polímero, ele deve ser preparado por meio de adição de insumos especiais, para somente depois receber o polímero. Essa compatibilidade significa o perfeito entrosamento entre o sistema asfalto-polímero, resultando em um produto com maior estabilidade possível. As propriedades mecânicas são afetadas pelo peso molecular, estrutura química e distribuição da cristalinidade (LEITE, 1999).

Os componentes devem ser misturados com frequente agitação para que o polímero seja incorporado ao ligante asfáltico, tomando-se cuidado para não exceder a temperatura e o tempo de reação. Portanto, o equipamento misturador deve possuir um sistema para controlar a temperatura e o tempo de reação de maneira constante e mais uniforme possível, além de um sistema de agitação que evite a segregação das partículas.

É necessária, ainda, a determinação do teor ótimo de polímero que confira ao novo ligante as propriedades desejadas. Quimicamente o teor ótimo de polímero deve ser tal que permita a inversão da matriz, ou seja, que o sistema deixe de ser uma matriz de ligante asfáltico com pontos de polímeros, e passe a ser uma matriz polimérica com estrutura do ligante asfáltico incluída nessas malhas interligadas (DE MOURA, 2001). Dada a dificuldade de se determinar quimicamente o polímero incorporado ao ligante asfáltico, procede-se este acompanhamento através de ensaios de caracterização dos materiais (DNER, 1998).

CAPÍTULO 3

3 - MATERIAIS

3.1 - AGREGADOS

Na estrutura química dos minerais, seus átomos estão dispostos em uma rede cristalina. Os átomos da superfície podem exercer atração sobre outros átomos que entram em íntimo contato com esta superfície, mantendo uma camada monomolecular dessas substâncias fortemente aderidas (VINHA, 1975). Este processo é chamado de adsorção química. Esse tipo de adsorção é o principal fator nas relações de adesividade entre o ligante asfáltico e o agregado. FARJALLAT (1972) comenta que as características de aderência e adesividade de ligantes asfálticos relacionam-se com o estado de alteração do agregado, conseqüentemente, a resistência da estrutura relaciona-se com a eficiência desta ligação.

Concretos asfálticos que possuem pouca adesividade do ligante ao agregado, quando aplicadas em pista, podem resultar em uma camada susceptível à desagregação. A desagregação superficial caracteriza-se pelo desprendimento do agregado devido aos esforços do pneu em contato com o pavimento em consequência da falta de resistência suficiente no contato ligante-agregado. A desagregação gera uma heterogeneidade nas misturas e descontinuidades que permitem a penetração d'água, que ao atingir as camadas inferiores dos pavimentos faz com que reduzam suas capacidades de suporte degenerando, por fim, a capacidade estrutural do pavimento como um todo (DE MOURA, 2001).

Os métodos de ensaio do DNER-ME 078 (1994) e da NBR 14329 (1999) recomendam que se lavem os agregados, isentando-os assim de pó em sua superfície. Ocorre que, no processo de usinagem dos concretos asfálticos, normalmente os agregados podem estar recobertos com pó da própria rocha. No processo de britagem, pode ser gerada uma boa quantidade de pó, dependendo do tipo de rocha e tipo de britagem. Parte deste pó fica aderida às paredes do agregado, podendo dificultar a adesividade do ligante aos agregados.

Seguindo os procedimentos laboratoriais das normas citadas acima, há a possibilidade de alguns agregados apresentarem boa

adesividade ligante-agregado como resultado dos ensaios, mas quando aplicadas aos concretos asfálticos em pista, com agregados não previamente lavados, podem não mostrar um desempenho satisfatório.

Um dos fatores que influenciam o comportamento dos concretos asfálticos é a granulometria. Pode-se dizer que a forma dos granulares e sua granulometria possuem uma influência sobre a duração de vida dos concretos asfálticos, pois atuam na compacidade e no atrito interno do material (MOMM, 1998).

Segundo a NBR 3310-1 (2010) as peneiras granulométricas são divididas em 50 aberturas. Essas aberturas normatizadas estão entre 100mm e 20 μ m. Para esta pesquisa são utilizadas dez peneiras normatizadas: 12,5mm; 9,5mm; 6,3mm; 4,75mm; 2,36mm; 1,18mm; 0,6mm; 0,3mm; 0,15mm; 0,075mm e a passante na 0,075mm. Os granulares são peneirados no Laboratório de Pavimentação da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) e identificados conforme a dimensão, como mostra a Figura 9.

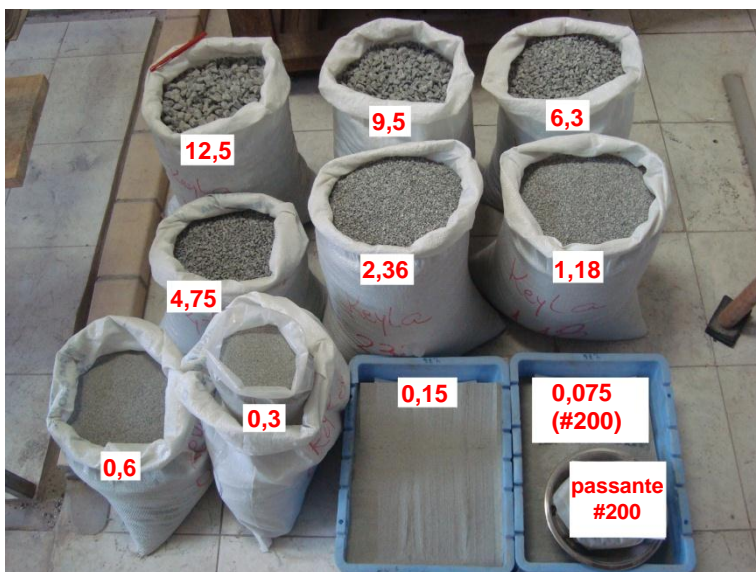


Figura 9 - Brita graduada.

A curva granulométrica escolhida para esta pesquisa encaixa-se na faixa “C” do DNIT (DNIT 031-ES, 2006), densa e graduada, calculada por QUINTERO (2011).

O cálculo das curvas granulométricas contínuas de Füller e Thompson (1907) está demonstrado na Equação (1.1). Esses autores realizaram trabalhos empíricos de correção da granulometria dos agregados naturais para a produção de concretos e argamassas. Eles concluíram, a partir de experimentos empíricos de dosagens, que para uma mesma porcentagem de cimento em um dado volume de concreto, havia certa distribuição de tamanhos de grãos do agregado que proporcionava maior resistência à ruptura e melhor trabalhabilidade, ou seja, a distribuição granulométrica influencia na compacidade da mistura, e quanto maior a compacidade, maior a resistência mecânica.

$$p = 100. \left(\frac{d}{D} \right)^n \quad (1.1)$$

Onde:

- p = % que passa na peneira de malha d;
- d = menor diâmetro considerado;
- D = diâmetro máximo;
- n = expoente em função de D , d e % de finos.

O expoente “ n ” calculado foi de aproximadamente 0,5 o que significa um agregado bem graduado entre os limites de D e d .

Na Tabela 4 encontram-se as aberturas das peneiras utilizadas nessa dissertação, as respectivas porcentagens passantes e os limites da faixa “C” do DNIT 031-ES (2006).

Tabela 4 - Valores da granulometria (QUINTERO, 2011).

ABERTURA DA PENEIRA (mm)	% PASSANTE	FAIXA "C" DNIT 031-ES (2006)
16,00	100	100-100
12,75	89,4	85-100
9,50	77,3	75-100
6,30	63,7	-
4,75	54,8	50-85
2,36	38,9	30-75
1,18	27,7	-
0,60	19,5	-
0,30	13,9	15-40
0,15	9,9	8-30
0,075	7	5-10

A curva granulométrica utilizada nessa dissertação é criada com os valores da Tabela 4, como mostra a Figura 10.

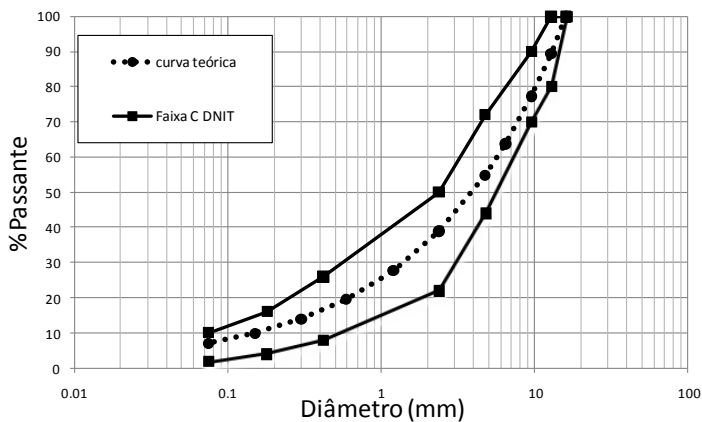


Figura 10 - Curva granulométrica inserida na Faixa "C" do DNIT (QUINTERO, 2011).

Os ensaios de caracterização do granular seguem as normas dos ensaios de abrasão Los Angeles (DNER-ME 035, 1998), Durabilidade (DNER-ME 089, 1994) e Absorção (DNER-ME 081, 1994). A seguir, são descritas resumidamente cada ensaio.

O ensaio comumente utilizado para medir a resistência à abrasão é o ensaio Los Angeles (DNER-ME 035, 1998). Nesse ensaio uma amostra de agregado de 5000g de agregado é submetida a 500 revoluções (na graduação “C”) no interior do cilindro de um equipamento padronizado. Oito esferas de aço, que varia conforme a granulometria da amostra, é adicionado ao cilindro induzindo impactos nas partículas durante as revoluções. O resultado é avaliado pela redução da massa inicial da amostra especificada.

O ensaio de Durabilidade (DNER-ME 089, 1994) tem como objetivo determinar a durabilidade dos agregados mediante a exposição dos mesmos ao ataque de soluções saturadas de sulfato de sódio ou de magnésio. Simula de maneira acelerada a desintegração do material pétreo frente à ação do intemperismo.

O ensaio de Absorção (DNER-ME 081, 1998) é a relação entre a massa de água absorvida pelo agregado gráudo após 24 horas de imersão à temperatura ambiente e massa inicial de material seco, sendo determinada para permitir o cálculo das massas específicas, real (no vácuo) e aparente (no ar) do agregado.

Para os ensaios de caracterização foram utilizados os granulares fornecidos pela pedreira Santa Bárbara localizada no município de Santo Amaro da Imperatriz/SC. QUINTERO (2011) utilizou os granulares da mesma pedreira e obteve os seguintes resultados de caracterização dos granulares graníticos, como mostra a Tabela 5.

Tabela 5 - Resultado da caracterização do granular
(QUINTERO, 2011).

ENSAIO	RESULTADO	LIMITES
Abrasão Los Angeles	19,96%	< 40,0%
Durabilidade	1,02%	< 12,0%
Absorção	0,40%	< 2,0%

Os resultados dos ensaios de caracterização dos granulares atenderam as especificações mínimas exigidas. O ensaio de abrasão Los

Angeles resultou em 19,96% e o máximo é de 40,0% (DNER-ME 035, 1998), o ensaio de Durabilidade resultou em 1,02% e o máximo é de 12,0% (DNER-ME 089, 1994) e o ensaio de Absorção resultou em 0,40% e o máximo, segundo a norma, é de 2,0% (DNER-ME 081, 1994).

3.2 - LIGANTE ASFÁLTICO MODIFICADO PELO EVA

A escolha do ligante asfáltico 50/70 para essa dissertação deve-se ao fato desse ligante possuir boa trabalhabilidade na temperatura ideal de usinagem, alta disponibilidade no mercado e ser o mais utilizado atualmente pelas empresas de pavimentação. O ligante asfáltico utilizado nessa dissertação provém da refinaria Presidente Getúlio Vargas – REPAR localizado no município de Araucária/PR.

O polímero EVA utilizado nesta pesquisa é encontrado na forma de *pellets*, como mostra a Figura 11. Todo o polímero utilizado na pesquisa foi cedido pela empresa Braskem S/A.



Figura 11 - Polímero EVA HM-728 em forma de *pellets*.

A porcentagem de polímero EVA escolhida para esta pesquisa é de 5%. Esse teor é escolhido após a verificação do comportamento dos concretos asfálticos através do ensaio de viscosidade realizado por BRINGEL (2007). Observou-se que os concretos com teores de EVA abaixo de 4% não tinham mudanças significativas comparando-as com o ligante convencional e misturas com teores de EVA acima de 6% apresentavam-se extremamente viscosas, tornando-se inadequadas para utilização.

Através de ensaios de recuperação elástica sabe-se que o teor de 5% de polímero EVA é o mínimo necessário para alcançar uma recuperação interessante para o concreto asfáltico (MORILHA, 2004).

A porcentagem do teor de polímero estudado por outros autores que realizaram pesquisas com ligantes modificados pelo EVA encontram-se entre 3,9% e 15%, como mostra a Tabela 6.

Tabela 6 - Teor de polímero EVA em outras bibliografias.

REFERÊNCIAS	CAP	TEOR DE POLÍMERO EVA (%)
ALENCAR <i>et al</i> (2009)	50/70	4,5
BRINGEL <i>et al</i> (2005)	50/70	4,5
FROTA; D'ANTONA (2011)	50/70	4
LEITE (1999)	50/70	5, 6, 10 e 15%
MORILHA (2004)	50/70	5
RODRIGUES <i>et al</i> (2009)	50/70	4
SANTOS; MARTINS (2007)	50/70	7,5
ZATTERA <i>et al</i> (2005)	50/70	3,9

Para que não houvessem outras variáveis e somente o efeito do polímero EVA fosse evidenciado, não é utilizado nenhum tipo de aditivo nesta pesquisa. O ligante asfáltico é modificado apenas pelo polímero EVA. Alguns autores utilizam diversos tipos de aditivos (em torno de 2% em peso) para que as características dos ligantes asfálticos melhorem.

Como exemplos são citados:

- ♦ cal hidratada (BRINGEL, 2007);
- ♦ líquido da castanha de caju (RODRIGUES *et al*, 2009);
- ♦ óleo extensor (BRINGEL, 2007);
- ♦ óleo aromático (ALENCAR *et al*, 2009);
- ♦ Adicap-Re (AMINOCAP, 2010).

Os dois últimos exemplos citados melhoram a estabilidade a estocagem e a recuperação elástica respectivamente. Caso o desejo seja o aumento no ponto de amolecimento, geralmente aumenta-se o teor de polímero no concreto asfáltico.

A modificação e todos os ensaios de caracterização do ligante deste trabalho são realizados na empresa CBB Indústria e Comércio de Asfaltos e Engenharia LTDA localizada na cidade de Curitiba/PR. Conforme dados da BRASKEM (2010), empresa fornecedora do EVA, a temperatura ideal para modificar o ligante asfáltico com o polímero é de 150°C. Essa temperatura de mistura não deve exceder 200°C para que as características do EVA não sejam prejudicadas.

A máquina modificadora utilizada é da marca WEG® (NBR 17094-2, 2008) de 1160 rpm, 60 Hz e temperatura que oscila entre 140-160°C. As seguintes etapas são seguidas para a modificação do ligante:

- a) Aquecer a máquina de mistura por aproximadamente 2 horas (Figura 12 - A) até atingir 110°C;
- b) Adicionar aproximadamente 13kg de ligante 50/70 previamente aquecidos a 150°C (Figura 12 - B);
- c) Manter a máquina de mistura entre 140°C e 160°C adicionando aos poucos, sob agitação circular, 5% em peso de copolímero EVA;
- d) Ativar o moinho da máquina de mistura;
- e) Modificar por 2 horas com a temperatura estabilizada;
- f) Ao final, o copolímero deve estar totalmente incorporado pelo ligante.



Figura 12 - Modificação do ligante:
(A) máquina; (B) adição de 13kg de ligante.

A modificação de um total de 55kg de ligante foram divididos em quatro séries de aproximadamente 14kg cada uma. A cada série são realizados os quatro tipos de ensaios de caracterização do ligante.

RODRIGUES *et al* (2009), NEGRÃO (2006) e BRINGEL *et al* (2005) fizeram o procedimento básico da mistura parecido com o que foi mostrado anteriormente, porém com algumas alterações devido à diferença da máquina modificadora (capacidade, oscilação da temperatura, moinho etc).

Dentre os muitos ensaios existentes para a caracterização do asfalto modificado (aproximadamente dez tipos) são escolhidos quatro ensaios para estudar a modificação pelo polímero EVA:

- ◆ Recuperação Elástica;
- ◆ Ponto de Amolecimento;
- ◆ Penetração e
- ◆ Viscosidade Brookfield.

3.2.1 - Recuperação Elástica

Após a modificação do ligante asfáltico 50/70 pelo polímero EVA, é realizado o ensaio de Recuperação Elástica (DNIT 130-ME,

2010) seguindo as etapas a seguir. A duração desse ensaio é de aproximadamente três horas e meia.

- a) Colocar o ligante, previamente aquecido a 150°C , em dois moldes de amostras. Antes, pincelar glicerina+cal nas peças para que o ligante não grude nos moldes (Figura 13 - A);
- b) Após 30 minutos colocar as amostras na água a 25°C ;
- c) Depois de mais 30 minutos tirar o excesso de ligante dos moldes com ajuda de uma espátula aquecida e voltar à água a 25°C (Figura 13 - B);
- d) Após 90 minutos colocar as amostras na máquina de ensaio, puxá-los até 20 cm e cortar ao meio com ajuda de uma tesoura (Figura 13 - C);
- e) Após 60 minutos verificar qual a % de recuperação elástica que a amostra obteve (Figura 13 - D).

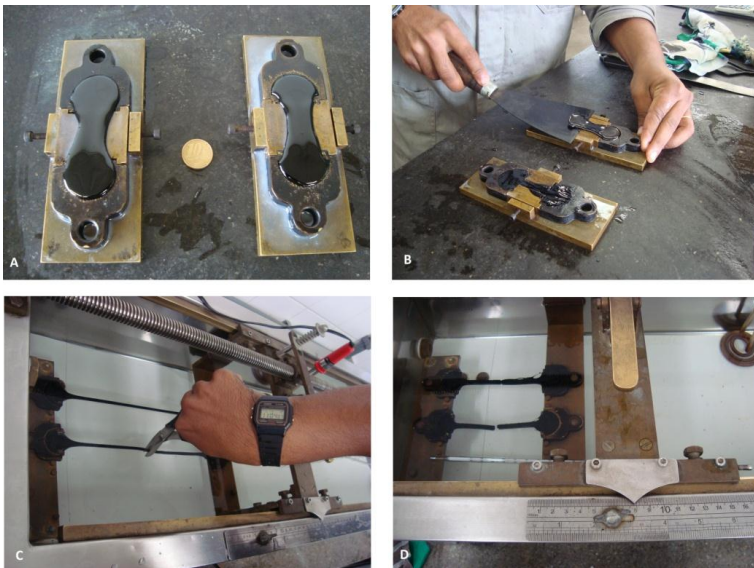


Figura 13 - Ensaio de Recuperação Elástica:

- (A) ligante nos moldes; (B) retirada do excesso de ligante;
(C) alongamento de 20 cm e corte; (D) medição da % de recuperação.

3.2.2 - Ponto de Amolecimento

Os resultados do ensaio de Ponto de Amolecimento indicam que quanto maior a temperatura do pavimento maior é a susceptibilidade do ligante ao afundamento de trilha de roda. Os ensaios de Deformação Permanente de BARRA (2009) mostram essa relação entre a temperatura e a deformação. A norma DNIT 131-ME (2010) especifica esse ensaio e a duração é de aproximadamente uma hora.

- a) Colocar o ligante, previamente aquecido a 150°C , em dois moldes de amostras. Antes, pincelar glicerina+cal nas peças para que o ligante não grude nos moldes (Figura 14 - A);
- b) Deixar repousar por 30 minutos em temperatura ambiente (Figura 14 - B), tirar o excesso de ligante dos moldes com ajuda de uma espátula aquecida e colocá-lo na água gelada;
- c) Após 20 minutos montar as amostras na máquina de ensaio juntamente com um termômetro e acender a chama;
- d) Quando a bola tocar a base, verificar a temperatura que ocorreu o ponto de amolecimento da amostra (Figura 14 - C).

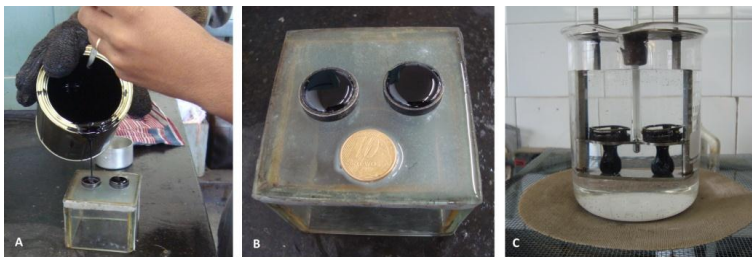


Figura 14 - Ensaio de Ponto de Amolecimento:

(A) ligante nos moldes; (B) repouso de 30 minutos; (C) fim do ensaio.

3.2.3 - Penetração

O ensaio de Penetração deve atender aos limites especificados pela classificação que designa o ligante asfáltico 50/70, ou seja, 50 a 70 décimos de milímetro para penetração. No caso do cimento asfáltico

modificado por polímero para uso em pavimentos, a Norma DNIT 155-ME (2010) especifica o intervalo de 30 a 150 décimos de milímetro, onde se enquadra o polímero EVA. A duração desse ensaio é de aproximadamente três horas.

- a) Colocar 70g de ligante, previamente aquecido a 150°C, em um molde de amostra (Figura 15 - A);
- b) Deixar repousar por 90 minutos em temperatura ambiente (Figura 15 - B) e colocar na água a 25°C;
- c) Após 90 minutos colocar a amostra na máquina de ensaio, encostar a agulha na amostra, zerar a leitura, acionar a válvula por 5 segundos (Figura 15 - C);
- d) Fazer de cinco a seis leituras e tirar a média para saber quantos mm a agulha penetrou na amostra.



Figura 15 - Ensaio de Penetração:

(A) ligante no molde; (B) repouso por 90 minutos; (C) leitura de ensaio.

3.2.4 - Viscosidade Brookfield

No ensaio de Viscosidade Brookfield (NBR 15184, 2004) é utilizado para caracterizar a rigidez do asfalto acima de 100°C na qual age quase que inteiramente como fluido viscoso. O aparelho é um viscosímetro rotacional de cilindros coaxiais, que mede a viscosidade através do torque necessário para rotacionar um *splindle* imerso na amostra de asfalto quente, a uma velocidade constante de 20 rpm. A duração desse ensaio é de aproximadamente uma hora.

- a) Colocar 7g de ligante previamente aquecido a 150°C no molde do ensaio;

- b) Escolher o *splindle* “S” correspondente ao ensaio (S03,S21 etc) e ajustá-lo à máquina;
- c) Ajustar a frequência correspondente para cada temperatura:
177°C → 100 rpm
150°C → 50 rpm
135°C → 20 rpm;
- d) No medidor de temperatura ajustá-lo ao ensaio (135°C, 150°C ou 177°C);
- e) Realizar o ensaio assim que essa temperatura estabilizar-se. A unidade dos resultados é em “cP”.

Na Figura 16 encontram-se o viscosímetro e o medidor de temperatura.



Figura 16 - Viscosímetro Brookfield.

3.2.5 - Resultados da caracterização dos ligantes modificados

Antes de mencionarmos os resultados da caracterização dos ligantes modificados, na Tabela 7 encontram-se os valores da

caracterização do ligante convencional 50/70. Estão incluídos também os valores limites preconizados na norma do DNIT 095-EM (2006) para os ensaios de Recuperação Elástica, Ponto de Amolecimento, Penetração e Viscosidade Brookfield.

Tabela 7 - Resultados dos ensaios de caracterização do ligante.

ENSAIO LIGANTE ASFÁLTICO 50/70 CONVENCIONAL	RESULTADO	DNIT 095-EM (2006)	
		mín.	máx.
Recuperação Elástica (%)	-	-	-
Ponto de Amolecimento (°C)	49,8	46	-
Penetração (0,1mm)	58	50	70
Viscos Brookf. 177°C (cP)	64	57	285
150°C (cP)	171	112	-
135°C (cp)	350	274	-

Atualmente o polímero EVA é inserido na lista dos polímeros mais utilizados para modificações de ligantes asfálticos, porém não há uma norma específica para ligantes modificados pelo EVA. Existe a norma do DNIT 129-EM (2011) que especifica os ligantes asfálticos modificados por polímeros elastoméricos. Cabe lembrar que dependendo do teor de acetato de vinila, o EVA pode ser considerado um elastômero ou um plastômero. Nessa pesquisa, o teor de acetato de vinila classifica o polímero como um elastômero, logo é possível utilizar a norma citada acima.

O ligante modificado pelo polímero EVA apresenta novas propriedades e relações físico-químicas diferentes do ligante convencional. Na Tabela 8 encontram-se todos os valores obtidos pela caracterização do ligante modificado e as faixas limites preconizados pela norma do DNIT 129-EM (2011).

Tabela 8 - Resultados dos ensaios de caracterização do ligante modificado com 5% de polímero EVA.

ENSAIO LIGANTE ASFÁLTICO MODIFICADO	RESULTADOS					DNIT 129 EM (2011)	
	n°1	n°2	n°3	n°4	média	mín.	máx.
Recup.Elástica (%)	58,0	55,0	60,0	59,5	58,1	75	-
Pt.Amolecimen (°C)	57,0	58,0	58,5	59,0	58,0	55	-
Penetração (0,1mm)	55,0	55,0	46,0	54,0	52,5	45	70
Brookfield 177°C	191	203	210	206	202,6	-	1000
150°C	515	555	572	560	550,5	-	2000
135°C	1025	1107	1143	1117	1098	-	3000

A recuperação elástica é a medida da capacidade de retorno do sistema asfalto-polímero após a ruptura. O valor de 58,1% de recuperação do EVA é inferior ao mínimo especificado pela norma de 75%. Mas mesmo o resultado sendo baixo, estudos laboratoriais de LEITE (1999) revelam que esta característica depende do tipo de polímero e a porcentagem em que é adicionada ao ligante. O retorno elástico que os ligantes modificados apresentam é responsável pela melhoria do desempenho dos concretos asfálticos quanto à fadiga e à deformação permanente.

O concreto asfáltico modificado pelo polímero fez com que o ponto de amolecimento aumentasse em 8,2°C em relação ao ligante convencional. O valor de 58,0 enquadra-se no limite mínimo da norma de 55°C.

A penetração de 52,5 encontra-se entre os limites propostos pela norma entre 45 e 70 (0,1)mm. O polímero fez com que o valor diminuísse em 5,5 em relação ao ligante convencional.

CUNHA *et al* (2010) também chegaram ao resultado onde o asfalto modificado pelo polímero EVA apresentou maior temperatura para o ponto de amolecimento e menor valor no ensaio de penetração em relação ao cimento asfáltico convencional.

A maior diferença de caracterização ocorreu na viscosidade, conforme já previsto na Figura 8 do item 2.2. As viscosidades Brookfield a 135°C, 150°C e 177°C aumentaram de 350cP para 1098cP, de 171cp para 550,5cP e de 64cp para 202,6cP respectivamente. Todos os valores encontrados neste ensaio estão dentro dos limites

especificados pela norma NBR 15184 (2004). A modificação com o polímero EVA fez com que o ligante asfáltico ficasse mais viscoso que o ligante convencional.

CAPÍTULO 4

4 - METODOLOGIA DOS ENSAIOS E PREPARAÇÃO DOS CONCRETOS ASFÁLTICOS

Formular concretos asfálticos para compor estruturas de pavimentos exige do engenheiro rodoviário mais do que apenas interpretar resultados de testes laboratoriais, mas principalmente conhecimento sobre a dinâmica dos processos de concepção, execução, solicitação e intemperização dos concretos asfálticos no campo, a fim de que se possam reproduzir em laboratório as condições mais próximas de avaliação correspondentes às situações práticas, e desta forma, avaliar corretamente o seu comportamento mecânico (BARRA, 2009).

Para que os ensaios em laboratório simulem e obtenham valores próximos à realidade em campo, é desejável que a relação dos resultados laboratório/campo esteja próximo de 1 para que sejam considerados satisfatórios. Os ensaios pela metodologia francesa possuem relação laboratório/campo entre 0,9 e 1,3, portanto, a escolhida para direcionar o estudo dessa dissertação.

A aproximação dos ensaios laboratoriais com a realidade deve-se ao fato do *Laboratoire Central des Ponts et Chaussées* – LCPC possuir um campo de teste que simula o tráfego real fazendo com que os pesquisadores elaborem e ajustem máquinas de ensaios para aproximá-los com os valores em campo (LCP, 2007).

A deterioração por fadiga é um dos maiores problemas dos pavimentos. A velocidade com que ocorre a fadiga depende da espessura do ligante ao redor do agregado. Uma porcentagem baixa ou uma porcentagem muito alta de ligante fará com que o concreto asfáltico sofra rapidamente a ruptura por fadiga. Tendo em vista esse fato é necessário calcular um teor ótimo do ligante para prolongar a vida útil do pavimento. Nove teores (4%; 4,25%; 4,5%; 4,75%; 5%; 5,25%; 5,5%, 5,75% e 6%) são testados nesta pesquisa.

Para que a proposta de alcançar bons concretos asfálticos seja satisfatória, cada formulação deverá ter um desempenho mínimo que esteja de acordo com as especificações referentes ao tipo de mistura em que se enquadram (NF 98-130 a 141, 1993). Os ensaios de PCG, Duriez, Deformação Permanente (níveis empíricos), Módulo Complexo e o ensaio de Fadiga (níveis fundamentais) seguem a hierarquia dos ensaios

da metodologia francesa. Na Figura 17 encontra-se a sequência de ensaios para cada nível de formulação.

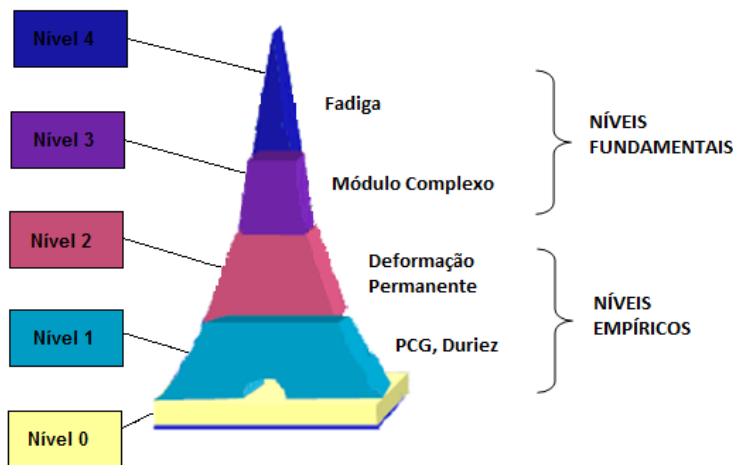


Figura 17 - Sequência dos níveis de formulação e os respectivos ensaios (LCP, 2007).

Os ensaios a Nível 0 corresponde à caracterização dos materiais e composição preliminar dos concretos asfálticos. Nos ensaios iniciais (Nível 1, 2 e 3) várias formulações são testadas com diferentes teores de ligante asfáltico para obter um teor ótimo. Os ensaios finais (Nível 3 e 4) apenas um teor de ligante é testado para verificar se o concreto asfáltico suporta as solicitações de campo propostas pelo projetista.

É importante enfatizar que todos os níveis são de caráter eliminatório, porém mesmo no caso de aprovação dos teores, não significa estarem aptas para aplicação em campo. Antes dessa conclusão, os seus desempenhos devem ser simulados e avaliados com o auxílio de ferramentas computacionais de cálculo destinadas ao dimensionamento de pavimentos, a fim de verificar a conformação conjunta das características de rigidez e de resistência à ruptura por fadiga (LPC, 2007).

4.1 - ENSAIO DA PCG E ENSAIO DE DOSAGEM MARSHALL

O ensaio da prensa de compactação por cisalhamento giratório - PCG (NF 98-252, 1999) é utilizado para verificar a habilidade de compactação dos concretos asfálticos impondo uma compactação lenta e isotérmica sob compressão estática, executada por um movimento cisalhante giratório de uma de suas faces em torno do eixo de simetria do corpo de prova. Devido à falta do equipamento de PCG disponível durante a etapa de ensaios dessa dissertação, optou-se pelo ensaio de dosagem Marshall.

O ensaio Marshall (NBR 12891, 1993) compõe um procedimento de dosagem para concretos asfálticos, que faz uso de parâmetros volumétricos da mistura. O ensaio consiste da aplicação de uma carga de compressão diametral sobre o corpo de prova cilíndrico regular de 100 mm de diâmetro e 63,5 mm de altura. Essa carga é aplicada no corpo de prova por meio de cabeçotes curvos padronizados.

O número de golpes é em função do volume de tráfego. São 50 golpes para tráfego entre $10^4 < N < 10^6$ e 75 golpes para tráfego $N > 10^6$, sendo N o número de repetições do eixo padrão sobre o pavimento.

A temperatura do ensaio é de 60°C e taxa de carregamento de 5 cm por minuto. Em geral a parte superior da prensa é fixa e o prato inferior se desloca para cima conforme a taxa mencionada. Devido à resistência do material ensaiado, é necessária uma força crescente para manter o prato inferior movendo-se na taxa especificada. Esta força cresce até um determinado ponto em que ocorre uma perda de estabilidade do material, causada por deslocamento ou quebra de agregados. A carga máxima correspondente a este ponto é denominada estabilidade Marshall e é expressa em unidade de força (BERNUCCI *et al*, 2007).

Antes de iniciarem os ensaios do Nível 1 (ensaio de PCG e Duriez), no Nível 0 é determinado o teor de partida do teor ótimo para a formulação de concretos asfálticos. Essa etapa pode ser realizada de duas maneiras, sendo a primeira considerando o teor de ligante asfáltico externo que diz respeito à quantidade adicionada além da massa dos granulares secos calculada pela equação de Fuller e Thompson (1907) e a segunda maneira é considerando o teor de ligante asfáltico interno correspondente à incorporação de um teor de ligante asfáltico que integra os 100% do concreto asfáltico.

As equações que determinam o teor de ligante de partida utilizando-se o módulo de riqueza e a superfície específica do esqueleto

mineral não são aplicáveis aos concretos asfálticos que contenham finos ou adições de polímeros (LCP, 2007). Como nessa dissertação é utilizado o polímero EVA, o teor de ligante de partida a ser testado é atribuído pela Equação (4.1).

$$TL_{int} = 100. \left(\frac{MB}{MSG + MB} \right) \quad (4.1)$$

Onde:

TL_{int} = teor de ligante asfáltico interno (%);
 MB = massa de ligante asfáltico;
 MGS = massa de granulares secos.

Um dia anterior à usinagem, o ligante asfáltico e os agregados são colocados na estufa a uma temperatura em torno de 50°C abaixo da temperatura calculada. Algumas horas antes da usinagem a estufa deve ser ajustada na temperatura correta. O concreto asfáltico deve ser colocado na estufa para homogeneização. Os moldes para compactação (base, “camisa” e o molde principal) devem estar na estufa para minimizar a perda de temperatura dos corpos de prova. É utilizado um tradutor de deslocamento do tipo LVDT (*Linear Diferencial Transformer*).

Depois de desmoldados todos os corpos de provas Marshall, são verificadas as massas secas e a altura média (em quatro diferentes pontos). Os corpos de prova foram envolvidos em fita adesiva como mostra a Figura 18.



Figura 18 - Corpos de prova Marshall antes da pesagem hidrostática.

O corpo de prova n° 25 da Figura 18 foi rejeitado devido a um problema no compactador.

A pesagem hidrostática, Figura 19, foi realizada para todos os corpos de prova.



Figura 19 - Pesagem hidrostática do corpo de prova Marshall.

Para o cálculo do teor de vazios é utilizada a densidade teórica. Para isso é necessário o cálculo prévio da massa específica volumétrica real dos granulares (MVR_g) e da massa específica volumétrica real do concreto asfáltico (MVR) que são determinadas pelas Equações 4.2, 4.3, 4.4, 4.5 e 4.6. A MVR corresponde à densidade máxima teórica da metodologia Marshall.

$$MVR_g = \frac{M_{amostra}}{V_{amostra}} \quad (4.2)$$

$$M_{amostra} = M_2 - M_1 \quad (4.3)$$

$$V_{amostra} = V_{pic} - V_{água} \quad (4.4)$$

$$V_{\text{água}} = \frac{M_1 - M_{\text{amostra}} - M_{\text{pic.vazio}}}{\rho_{\text{água}}} \quad (4.5)$$

$$MVR = \frac{M_1 - M_2}{1000 \cdot V_{\text{pic}} - \frac{M_3 - M_2}{\rho_{\text{água}}}} \quad (4.6)$$

Onde:

MVR_g	=	massa volumétrica real dos granulares (g/cm ³);
M_{amostra}	=	massa amostra (g);
V_{amostra}	=	volume amostra (g);
M_1	=	massa picnômetro + água (g);
M_2	=	massa picnômetro + água + amostra (g);
V_{pic}	=	volume picnomêtro (cm ³);
$V_{\text{água}}$	=	volume água (cm ³);
$M_{\text{pic.vazio}}$	=	massa picnômetro vazio (g);
$\rho_{\text{água}}$	=	massa específica água (g/cm ³);
MVR	=	massa volumétrica real concreto asfáltico (g/cm ³);
M_3	=	massa picnôm + água + amostra + bomba vácuo (g).

Com a análise de parâmetros físicos do ensaio Marshall é definido o teor ótimo do concreto asfáltico. Entre os parâmetros estão a estabilidade, o teor de vazios, a relação betume-vazios (RBV), os vazios do agregado mineral (VAM), a fluência além da massa específica aparente.

A Tabela 9 mostra os limites para concretos asfálticos densos especificados pelas normas NBR 12891 (1993) e DNER-ME 43 (1995).

Tabela 9 - Limites para os parâmetros de análise do ensaio Marshall.

PARÂMETROS	ABNT NBR 1289 (1993)	DNER-ME 43 (1995)
Estabilidade (kgf)	250 a 350	> 500
Teor de vazios (%)	3,0 a 5,0	3,0 a 5,0
RBV (%)	-	75 a 82
VAM (%)	-	> 16
Fluência (mm)	2,0 a 4,6	-

A NBR 12891 (1993) não especifica o RBV e VAM e a norma DNER-ME 43 (1995) não especifica a fluência.

4.2 - ENSAIO DURIEZ

O ensaio Duriez (NF 98-251-1, 1995) visa romper à compressão direta simples para avaliar a perda de resistência devido à ação da água. São utilizados no mínimo doze corpos de prova com massa total de 1.000g para composições granulométricas com $D_{máx} < 14,0\text{mm}$.

Antes do início da compactação, os moldes cilíndricos de aço ($80,0\text{mm} \pm 1\text{mm}$ de diâmetro interno e 190mm de altura) são colocados por duas horas na estufa na temperatura de usinagem.

Depois da usinagem dos doze corpos de prova, estes permanecem na estufa na temperatura de compactação por um período de duas horas, como mostra a Figura 20.



Figura 20 - Homogeneização na estufa dos corpos de prova.

A compactação é feita por duplo pistão com carga aplicada especificada de 60kN, como mostra a Figura 21. Essa carga deve ser atingida no máximo em 60s e mantida até 5 minutos com tolerância de 5 segundos. A carga é interrompida quando é finalizado esse tempo.



Figura 21 - Máquina do ensaio Duriez.

A retirada dos corpos de prova dos moldes (desmoldagem) é realizada quando atingirem a temperatura ambiente (no mínimo quatro horas após a compactação). As vinte e quatro horas após a compactação é denominada tempo de cura e os corpos de prova devem permanecer em repouso em temperatura ambiente (15°C a 25°C).

Depois de desmoldados todos os corpos de provas, as massas e a altura média (em três diferentes pontos) são verificadas, havendo uma tolerância de $1,0\text{g}$ e $0,1\text{mm}$ respectivamente.

A massa específica volumétrica aparente (MV_a) é calculada em relação às medidas geométricas. Faz-se uma triagem retirando o corpo de prova que tiver o MV_a afastado da média em $\pm 1,0\%$.

Com os valores de MV_a , os corpos de prova são divididos em três grupos com características homogêneas. A média de MV_a de cada grupo deve ter um valor próximo da MV_a média do lote inteiro.

Dos doze corpos de prova, dois são utilizados para medir a massa volumétrica hidrostáticas (MV_{hid}), cinco corpos de prova para conservação sem imersão e os últimos cinco corpos para conservação sob imersão. As duas unidades selecionadas para o cálculo do MV_{hid} possibilitam calcular o teor de vazios obtidos após a compactação. O valor de MVR utilizado é o mesmo calculado no ensaio Marshall, visto no item 4.1.

Os corpos de prova destinados à conservação sem imersão são colocados em uma câmara térmica a 18°C e umidade relativa do ar controlada em $50 \pm 10\%$ durante sete dias.

Já para os corpos de prova destinados à conservação com imersão, inicialmente é feita uma limpeza de desobstrução dos vazios após vinte e quatro horas da compactação, através de uma bomba de vácuo. Lava-se rapidamente os cinco corpos de prova e estes são submetidos à pressão residual de 350 mmHg (467 mbar) $\pm 5\%$ por aproximadamente uma hora. Em seguida, a água é introduzida na bomba de vácuo e mantida por mais duas horas. Depois dessa etapa, os corpos de prova são retirados da bomba de vácuo e pesados. São colocados em uma câmara térmica a 18°C imersos durante sete dias. Durante esses sete dias os corpos de prova são pesados mais duas vezes, no segundo ou quarto dia e no sétimo dia.

Após o sétimo dia de ensaio, os corpos de prova são rompidos por compressão simples em uma prensa com uma velocidade de avanço do prato de 1 mm por segundo e o valor de carga máxima é anotado. O cálculo da resistência à compressão (em MPa) é feito através da Equação (4.7).

$$\sigma = \frac{F}{A'} \quad (4.7)$$

Onde:

F = carga máxima de ruptura (kgf);

A' = área da seção transversal (cm²).

É calculada, então, a média dos resultados dos cinco corpos de prova de cada teor. Com os valores médios da resistência à compressão é obtida a relação r/R (sendo r, com imersão, e R, sem imersão).

Para o tipo de concreto asfáltico utilizado nessa pesquisa, a relação r/R deve ter um valor superior a 0,70 que significa perda de menos de 30% de resistência. Existem outros tipos de misturas que estabelecem valores de tolerância de acordo com as suas classificações (NF P 98-130 a 141, 1993).

4.3 - ENSAIO DE DEFORMAÇÃO PERMANENTE

O ensaio de Deformação Permanente (NF 98-253-1, 1993) visa verificar a resistência dos concretos asfálticos em relação ao afundamento nas trilhas de roda. Uma mesa compactadora pneumática é utilizada para moldar as placas de acordo com os critérios da NF 98-250-2 (1991), como mostra a Figura 22.



Figura 22 - Compactação da placa do ensaio de Deformação Permanente.

As placas possuem as dimensões de 50 cm de comprimento, 18 cm de largura e 5 cm ou 10 cm de espessura, dependendo da espessura de utilização em campo. Depois de compactadas, as placas devem permanecer no mínimo dois dias para o período de cura do concreto asfáltico.

Após esse período as placas são colocadas na máquina de ensaio que possui uma câmara de aquecimento interno que pode atingir 70°C. A máquina comporta ensaiar duas placas ao mesmo tempo utilizando duas rodas lisas em um eixo simples com carga de 5,0 kN, pressão de inflação de 0,6 MPa e temperatura de 60°C, como mostra a Figura 23.



Figura 23 - Máquina do ensaio de Deformação Permanente.

Antes do início do ensaio, o interior da câmara térmica precisa atingir 60°C , demandando aproximadamente quatro horas. Durante o ensaio a temperatura é controlada através de uma sonda térmica inserida na placa, como mostra a Figura 24.

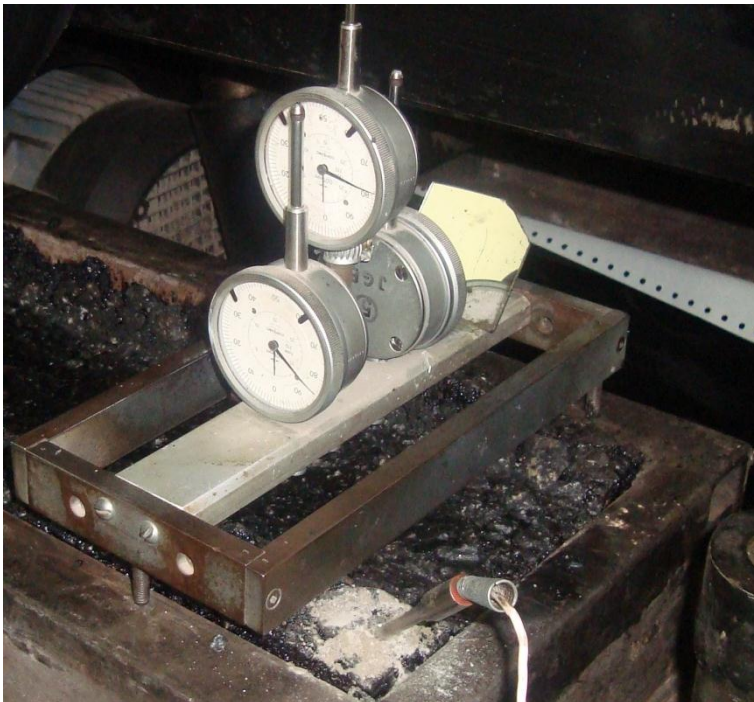


Figura 24 - Medidor de deformação e sonda térmica da máquina de Deformação Permanente.

As primeiras leituras são feitas para avaliar as condições superficiais da placa. São utilizados extensômetros que medem quinze pontos distintos, como mostra a

Figura 25, que servem como ponto de partida às leituras realizadas após as solicitações durante 100, 300, 1.000, 3.000, 10.000 e 30.000 ciclos.

Os dados com os cálculos das frações para o ensaio de Deformação Permanente do concreto asfáltico convencional e concreto asfáltico modificado encontram-se no Apêndice 1.

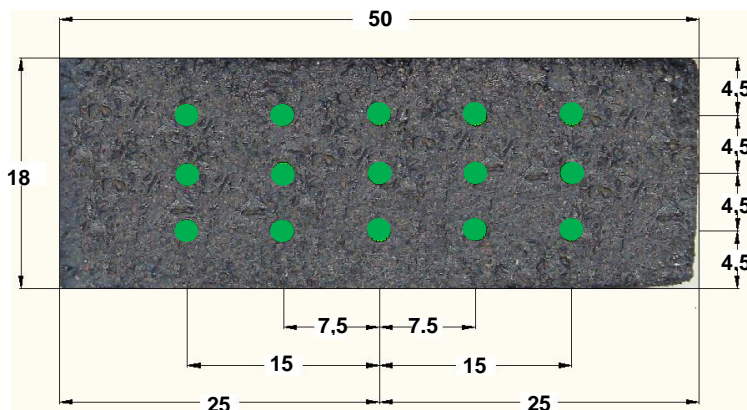


Figura 25 - Pontos de leitura do ensaio de Deformação Permanente.

Uma passagem de ida e volta do eixo resultam em um ciclo. É feita a média dos quinze pontos de afundamento em cada ciclo após a ação do carregamento. Os ciclos são submetidos à frequência constante de 1 Hz na qual o eixo solicitante percorre as placas na mesma trilha de roda. Se caso o afundamento médio alcançar 15% do valor da espessura inicial, o ensaio é interrompido.

Os resultados do ensaio de Deformação Permanente são calculados segundo a Equação (4.8).

$$Y = A'' \cdot \left(\frac{N}{1.000} \right)^b \quad (4.8)$$

Onde:

- Y = profundidade da deformação em N ciclos;
- A'' = profundidade da deformação a 1.000 ciclos;
- N = número de ciclos;
- b = inclinação da reta em coordenadas logarítmicas.

O resultado do ensaio de Deformação Permanente é satisfatório quando a espessura final não ultrapassar 5%, 7,5% ou 10% da espessura inicial. As placas que tiverem resultados abaixo de 10% não apresentam

riscos de deformação permanente em condições ditas Severas e resultados abaixo de 5% não apresentam riscos em condições ditas Muito Severas. O valor de 7,5% é uma condição intermediária (LCP, 2007).

4.4 - SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS DO ENSAIO DE FADIGA E MÓDULO COMPLEXO

Os ensaios de Módulo Complexo e de Fadiga serão expostos posteriormente nos itens 4.5 e 4.6 respectivamente. Antes de iniciar esses ensaios é necessário compreender os componentes da máquina, os procedimentos e a aferição do sistema de aquisição de dados.

Os ensaios de Módulo Complexo e de Fadiga são realizados na máquina da Figura 26, projetada pelo Laboratório de Pavimentação da UFSC. Essa máquina está capacitada a realizar os ensaios conforme as normas francesas.



Figura 26 - Máquina do ensaio de Fadiga e Módulo Complexo.

4.4.1 - Os componentes da máquina

Um desenho esquemático mostra os dispositivos da máquina de ensaio com solicitação por flexão alternada, como mostra a Figura 27.

Onde:

1. Motor eletromagnético com excêntrico;
2. Sensor de força (célula de pressão);
3. Sensor de deslocamento (efeito *Hall*);
4. Corpo de prova trapezoidal;
5. Zona limite de ruptura;
6. Solicitação por vibração sinusoidal.

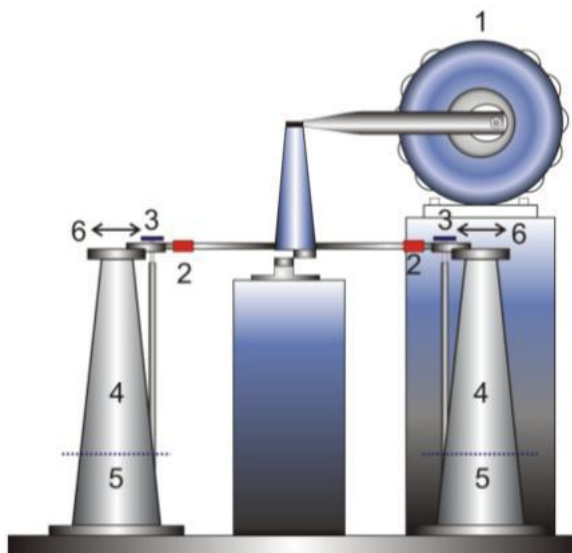


Figura 27 - Dispositivo para o ensaio de flexão alternada (OTTO, 2009).

Os eixos excêntricos são interligados ao motor da máquina, que possuem quatro pólos e potência de 1 HP, como mostra a Figura 28.



Figura 28 - Rotor da máquina.

O sensor deslocamento, por efeito *hall*, acoplado à haste é mostrado na Figura 29.



Figura 29 - Sensor de efeito *hall*.

No sistema de aquisição de dados existem oito canais utilizados para obter as informações do ensaio de Módulo Complexo e Fadiga. Esses canais são divididos conforme a Tabela 10. A força é medida através das células de carga e o deslocamento é medido através do efeito *hall*.

Tabela 10 - Canais do sistema de aquisição de dados.

CORPO DE PROVA	LEITURA DA FORÇA	LEITURA DO DESLOCAMENTO
	CANAL	
1	0	4
2	1	5
3	2	6
4	3	7

A máquina possui um sistema de resfriamento e aquecimento, para a execução dos ensaios a várias temperaturas. O resfriamento é realizado através de um evaporador localizado no interior da câmara que permite a circulação do ar. Já para o aquecimento utiliza-se uma resistência de elevada transmissão de calor. Todo esse sistema é ditado por um controlador digital.

A máquina possui quatro controladores de temperatura, sendo dois para o sistema frio e dois para o sistema quente. Na câmara superior encontra-se um controlador digital como mostra a Figura 30, divididos em quente e frio.



Figura 30 - Controlador digital superior do sistema de resfriamento e aquecimento.

Na câmara inferior encontram-se dois controladores manuais como mostra a Figura 31.



Figura 31 - Controlador inferior manual do sistema de resfriamento e aquecimento.

4.4.2 - Aferição da amplitude

Como dito anteriormente, antes do início do ensaio de Fadiga e Módulo Complexo é realizada a calibração da máquina. Um extensômetro, Figura 32, é utilizado para aferir a amplitude dos três valores de deformação escolhidos para realizar o ensaio.

O extensômetro é posicionado na base menor do corpo de prova. As medições são obtidas no domínio das pequenas deformações, ou seja, inferiores a 50×10^{-6} . A aferição é realizada rotacionando o motor eletromagnético.



Figura 32 - Medidor de deslocamento (μ def).

Quando os quatro corpos de prova são trocados e o próximo ensaio corresponde à mesma deformação, pode-se utilizar a mesma calibragem, desde que os corpos de provas seguintes tenham o mesmo valor de amplitude.

4.4.3 - Aferição dos sensores de deslocamento

A aferição dos sensores de deslocamento para a configuração de entrada dos sinais é feito por regressão linear. Para aferir os sensores de deslocamento, utiliza-se o *software* AqDados 7.02, como mostra a Figura 33.

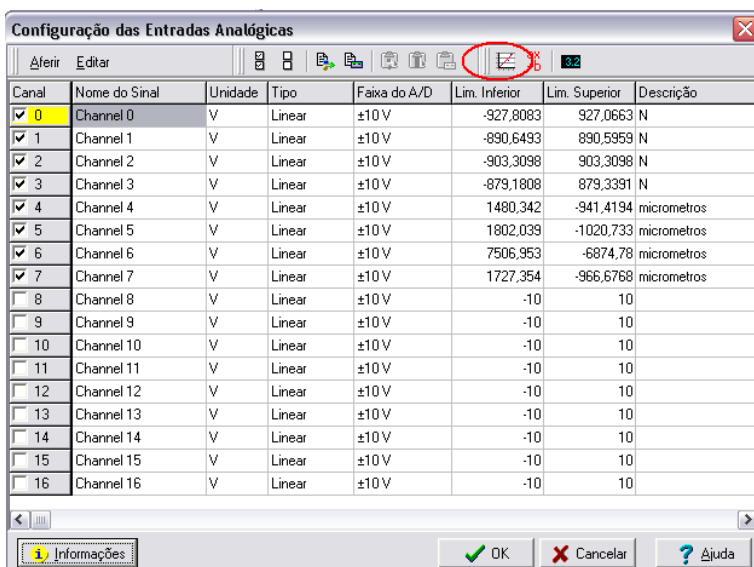


Figura 33 - Aferição do deslocamento.

Os canais de deslocamento são os canais 4, 5, 6 e 7, como foi citado na Tabela 10. É possível aferir os canais com o extensômetro, lembrando-se de remover os dados anteriores. São realizadas no mínimo três leituras e no máximo cinquenta leituras em pontos diferentes para

cada canal, podendo ser uma de tração, uma de compressão e o deslocamento zero.

A partir da inserção de cada leitura na tabela, o *software* realiza a regressão linear dos pontos tabelados e apresenta os limites calculados e o índice de correlação. Se a correlação entre as leituras estiver acima de 95%, como na Figura 34, os limites calculados podem ser aceitos. O *software* verifica a correlação entre os máximos e mínimos da amplitude.

Aferição por Regressão Linear

Canal: 5
Nome: Channel 5
Unidade: V
Tipo: Linear

Limites Especificados

Inferior	Superior	
-10,0	10,0	V
1873,147	-1577,189	V

Limites Calculados

Inferior	Superior	
-10,0	10,0	V
1873,147	-1577,189	V

Ganho K: -0,005796537 V / V
Ganho 1/K: -172,5168 V / V

Tabela de Calibração

Valor no A/D: 1,8994 V
Valor Calculado: -179,6992 V
Valor Engenharia: -167,5 V

Ler A/D

Inserir
Remover
Copiar

	V	Val. Eng.
1	0,6403	0
2	0,0336	167,5
3	1,8994	-167,5

Correlação: 96,08 %

Aceita Limites Calculados Ganho Sair Cancelar Ajuda

Figura 34 - Correlação acima de 95% para aferição do deslocamento.

4.4.4 - Aferição das células de carga

No sistema de aquisição de dados dos ensaios de Fadiga e Módulo Complexo, os canais correspondentes às células de carga são 0, 1, 2 e 3, como foi citado na Tabela 10.

A aferição por ganho e referência das células é realizada na configuração das entradas analógicas do sistema, como mostra a Figura

35. Caso seja necessário, o ajuste é realizado manualmente no *hardware* de aquisição de sinais.

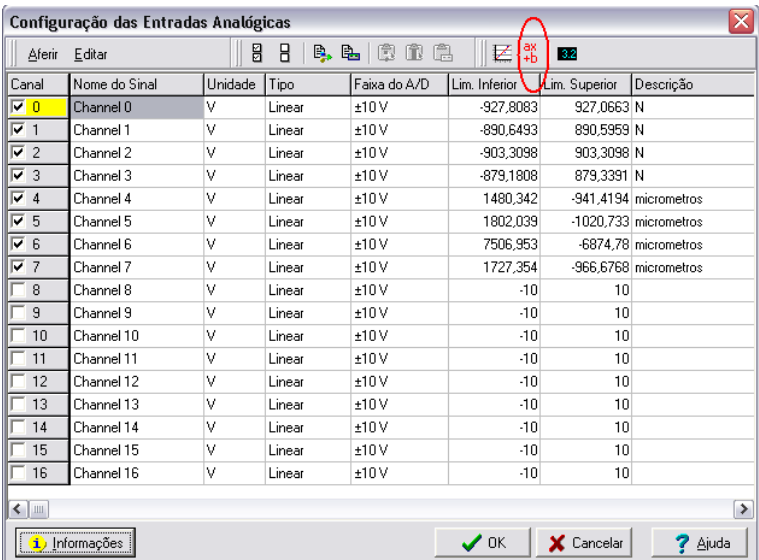


Figura 35 - Aferição das células de carga por ganho e referência.

Para cada corpo de prova LER A/D do canal correspondente e calibrá-lo no equipamento, como mostra a Figura 36, até que o valor se aproxime do zero. Ao final de cada canal aferido, aceitar os limites calculados.



Figura 36 - Sistema de aquisição de dados.

Os cabos provêm das células de carga e dos sensores de efeito *hall* que transmitem aos canais do sistema de aquisição de dados. Com todas as etapas de aferição finalizadas, somente após 6 horas inicia-se o ensaio de Módulo Complexo ou de Fadiga. Esse tempo é necessário para que ocorra a homogeneização dos corpos de prova na temperatura de ensaio. Vale ressaltar que para não forçar o compressor, logo após ligar a máquina, é recomendado deixar a câmara inferior em 0°C.

4.4.5 - Início do ensaio para aquisição de dados

Após a homogeneização por 6 horas da máquina, como citado no item anterior, é escolhido o tipo de modo de aquisição. O tipo múltiplo programado é utilizado no ensaio de Fadiga e o tipo múltiplo sequencial é utilizado para o ensaio de Módulo Complexo. O múltiplo programado gera dados em pacotes para ensaios mais demorados e o múltiplo sequencial gera dados sem interrupções.

Os valores de força e de deslocamento são decodificados com o auxílio de uma interface computacional em planilhas Excel em tempo

real. Os sinais de voltagem emitidos pelas células de carga e pelos sensores *hall* são transformados em força (N) e deslocamento (μm) respectivamente.

O efeito *hall* dá a precisão do ângulo de fase que é o fator mais relevante para o ensaio de Módulo Complexo e de Fadiga. A defasagem (ϕ) é obtida utilizando uma série de *Fourier* entre a força e a deformação.

Os detalhamentos das aferições, da montagem e do processo de finalização dos ensaios encontram-se no Apêndice 2 e Apêndice 3.

4.5 - ENSAIO DE MÓDULO COMPLEXO

O ensaio de Módulo Complexo determina a rigidez dos concretos asfálticos e podem ser executados de três maneiras:

- ♦ tração/compressão;
- ♦ flexão de pontos de apoio;
- ♦ sob cisalhamento.

Essas formas de ensaio são divididas em dois grupos:

- ♦ homogêneos (obtêm-se diretamente os valores de tensão e deformação);
- ♦ não homogêneos (tensão e deformação dependentes da estrutura geométrica do corpo de prova).

Os concretos asfálticos, diferentemente dos materiais puramente elásticos, herdam as características do cimento asfáltico que os contém e possuem um comportamento viscoelástico e termosusceptível sendo, assim, dependentes da temperatura e da frequência de sollicitação (DE LA ROCHE, 1996).

Os ensaios partem dos valores de força e deformações aplicadas nos corpos de prova para determinar o Módulo Complexo (MOMM, 1998). Quanto à característica viscoelástica do material, a deformação apresenta uma defasagem com relação à tensão, o que é traduzido por um ângulo de fase (ϕ) entre os dois sinais, como mostra a Equação (4.9). O ângulo de fase permite estimar a energia de dissipação do material.

$$\varepsilon = \varepsilon . \text{sen}(\omega t - \varphi) \quad (4.9)$$

Onde:

ε	=	deformação;
ω	=	pulsção do sinal;
t	=	tempo;
φ	=	ângulo de fase ou defasagem.

Os parâmetros indicam a predominância viscosa ou elástica do material, para os valores limites de $\varphi = 0^\circ$, para materiais puramente elásticos, e $\varphi = 90^\circ$ para materiais puramente viscosos. A defasagem de sinais depende da dimensão do corpo de prova e dos efeitos da inércia do corpo de prova.

O ensaio de Módulo Complexo escolhido para essa pesquisa é à flexão alternada de dois pontos (2PB) em modo contínuo com o controle da amplitude de deslocamento do corpo de prova trapezoidal. O material é submetido a solicitações do tipo senoidal. Obtém-se o comportamento a diversas temperaturas e frequências de solicitação. A norma que rege a metodologia deste ensaio é a NF 12697-26 (2004).

As temperaturas de teste para o ensaio de Módulo Complexo geralmente são realizadas a -10°C , 0°C , 10°C , 15°C , 20°C , 30°C e 40°C e frequências de 1Hz, 3Hz, 10Hz e 30Hz, como mostra o fluxograma da Figura 37.

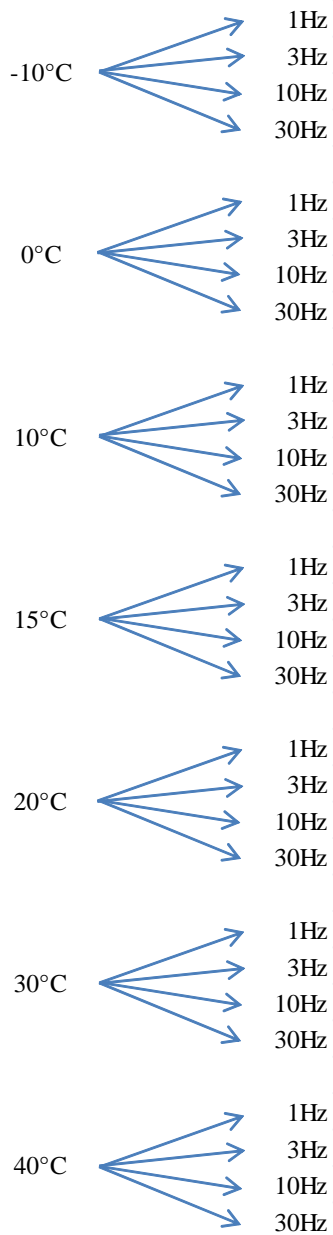


Figura 37 - Temperaturas e frequências de ensaio.

Os resultados do Módulo Complexo a 15°C e 10 Hz são utilizados para o dimensionamento por serem considerados valores críticos segundo as normas francesas. A frequência de 10 Hz equivale a uma velocidade de 72km/h.

4.5.1 - Compactação das placas

Os corpos de provas trapezoidais são extraídos de placas de concreto asfáltico com dimensões de 60 cm de comprimento, 40 cm de largura e 12 cm de espessura. As placas são postas na mesa de compactação e segue o mesmo princípio de uma compactação em campo, utilizando pneumáticos com pressão ajustável acoplado a um macaco hidráulico. Para a compactação dessas placas, é utilizado um conjunto de rodas duplas, como mostra a Figura 38.



Figura 38 - Início do processo de compactação da placa de Módulo Complexo e Fadiga.

Na Figura 39 apresenta-se o bloco de comando onde são ajustadas as pressões de ensaio e programação das passadas conforme a NFP 98-250-2 (1991).



Figura 39 - Bloco de comando da mesa de compactação.

4.5.2 - Serragem dos corpos de prova

Depois de compactar e desmoldar as placas é feito a serragem seguindo a NF 98-250-3 (1993). É utilizado um disco diamantado na máquina de corte para a obtenção de corpos de provas trapezoidais com as dimensões conforme a Tabela 11.

Tabela 11 - Dimensões dos corpos de prova trapezoidais.

DESCRIÇÃO	DIMENSÕES
Espessura (e)	$25,00 \pm 1,00$ mm
Base maior (B)	$70,00 \pm 1,00$ mm
Base menor (b)	$25,00 \pm 1,00$ mm
Altura (h)	$250,00 \pm 1,00$ mm

Na Figura 40 encontra-se um desenho esquemático do corpo de prova trapezoidal.

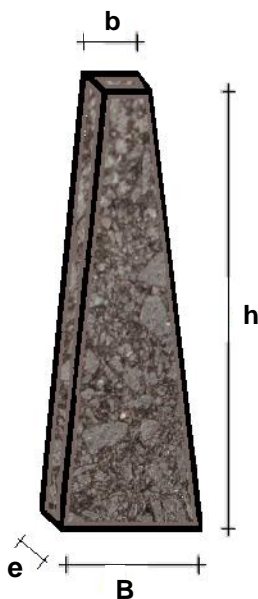


Figura 40 – Corpo de prova trapezoidal.

Para o resfriamento do disco diamantado é utilizado água durante a serragem das placas, como mostra a Figura 41. A máquina de corte está calibrada para funcionar a uma velocidade de 2 cm por minuto.



Figura 41 - Resfriamento da serra de corte.

A Figura 42 mostra um desenho esquemático de como o corpo de prova trapezoidal encontra-se dentro da placa de concreto asfáltico.

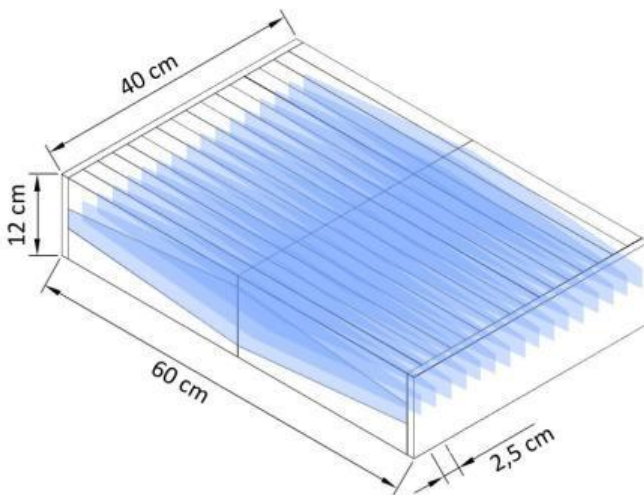


Figura 42 - Esquema de corte dos corpos de prova trapezoidal (OTTO, 2009).

Duas placas de 60 cm x 40 cm x 12 cm são alinhadas na máquina de corte para o início da serragem, como mostra a Figura 43.



Figura 43 - Duas placas de 60 cm x 40 cm x 12 cm alinhadas para o início da serragem.

Para a obtenção dos corpos de provas trapezoidais, inicialmente são cortadas as laterais da placa e feito um corte a 250 mm das bordas. Com isso, são geradas as quatro metades para obtenção das plaquetas. Cada corte nas metades alinhadas obtem-se quatro plaquetas, como mostra a Figura 44.



Figura 44 - Quatro metades alinhadas.

O corte final para gerar os corpos de prova trapezoidais, é feito com quatro plaquetas sobrepostas que são fixadas na mesa de corte com a angulação pré-definida, como mostra a Figura 45.



Figura 45 - Corte dos corpos de prova trapezoidais.

Após o processo de serragem, os corpos de provas trapezoidais ficam em repouso a uma temperatura ambiente abaixo de 30°C (de preferência a 18°C) para que não ocorram problemas de deformação. O tempo de cura das amostras deve ser de 15 a 60 dias.

Na Figura 46 encontram-se os corpos de prova do concreto asfáltico modificado pelo polímero EVA em repouso.



Figura 46 - Corpos de prova trapezoidais em repouso.

4.5.3 - Triagem dos corpos de prova

Depois do intervalo de cura dos corpos de prova trapezoidais, estes são submetidos a um processo de triagem em função das dimensões e teor de vazios. As variáveis da triagem são denominadas K_σ e K_ε como mostram as Equações (4.10) e (4.11) respectivamente. Os valores de K_σ e K_ε correlacionam a forma do corpo de prova. No processo de triagem há uma tolerância de $\pm 1,0$ mm.

$$K_\sigma = \frac{3 \cdot h}{2 \cdot e \cdot b \cdot (B - b)} \quad (4.10)$$

$$K_\varepsilon = \frac{(B - b)^2}{8 \cdot b \cdot h^2 \cdot \left(\frac{(B - b) \cdot (3B - b)}{2 \cdot B^2} - \ln \frac{B}{b} \right)} \quad (4.11)$$

Onde:

K_σ	}	coeficientes relacionados às dimensões do corpo de prova (mm^{-1});
K_ε		
h	=	altura do corpo de prova (mm);
e	=	espessura do corpo de prova (mm);
B	=	base maior do corpo de prova (mm);
b	=	base menor do corpo de prova (mm).

A triagem é realizada em duas etapas: a primeira eliminação é em relação às dimensões e a segunda eliminação é em relação ao teor de vazios onde os corpos de prova devem estar entre os limites do desvio padrão. O teor de vazios é calculado conforme Equação (4.12).

$$V(\%) = \frac{100. (MVR - MVA)}{MVR} \quad (4.12)$$

Onde:

MVR = massa volumétrica real do corpo de prova;
MVA = massa volumétrica aparente do corpo de prova.

Os corpos de provas devem estar dentro das especificações normativas, citadas na Tabela 11, e o desvio padrão do teor de vazios deve ser $\leq 0,5$ após a serragem. Os corpos de prova que obedecerem a esses requisitos são separados conforme a homogeneidade e agrupados em quartetos. Lembrando que no processo de triagem, o coeficiente de variação de K_ε deve ser $\leq 1,0\%$.

4.5.4 - As etapas do ensaio de Módulo Complexo

São utilizados no mínimo vinte e quatro corpos de prova, divididos em três grupos de oito unidades. Para cada um dos três grupos é testado um nível diferente de deformação em que a flecha e a amplitude do deslocamento são calculadas pelas Equações (4.13) e (4.14) respectivamente.

$$f = \frac{\varepsilon_{máx}}{K_\varepsilon} \quad (4.13)$$

$$A = 2. f \quad (4.14)$$

Onde:

- f = flecha do deslocamento aplicado na base menor do corpo de prova;
 $\epsilon_{\text{máx}}$ = deformação máxima escolhida pelo projetista (10^{-6});
 K_{ϵ} = coeficiente relacionado às dimensões do corpo de prova (mm^{-1});
 A = amplitude do deslocamento aplicado na base menor do corpo de prova.

A flecha e a amplitude do deslocamento serão aferidas nos eixos excêntricos antes do início dos ensaios. A Figura 47 mostra um desenho esquemático da flecha e da amplitude aplicadas na base menor dos corpos de prova trapezoidais.

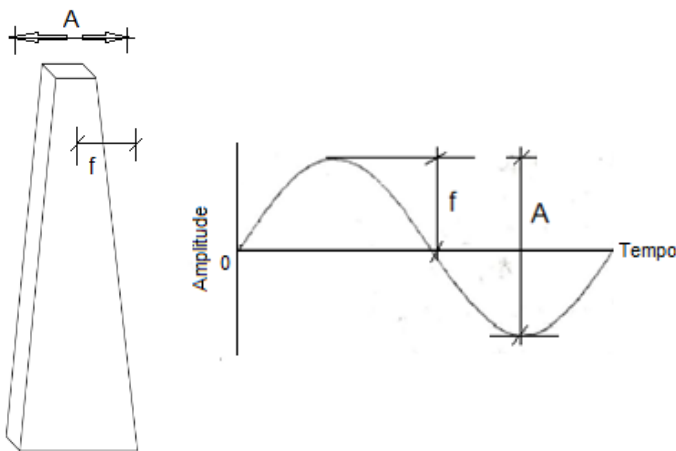


Figura 47 - Sinal da amplitude e da flecha.

A captação de dados do ensaio de Módulo Complexo é feito por múltiplo sequencial. Nesse tipo de captação, os dados são armazenados por pacotes em intervalos determinados. No exemplo da Figura 48 os dados são captados a cada 10 segundos.

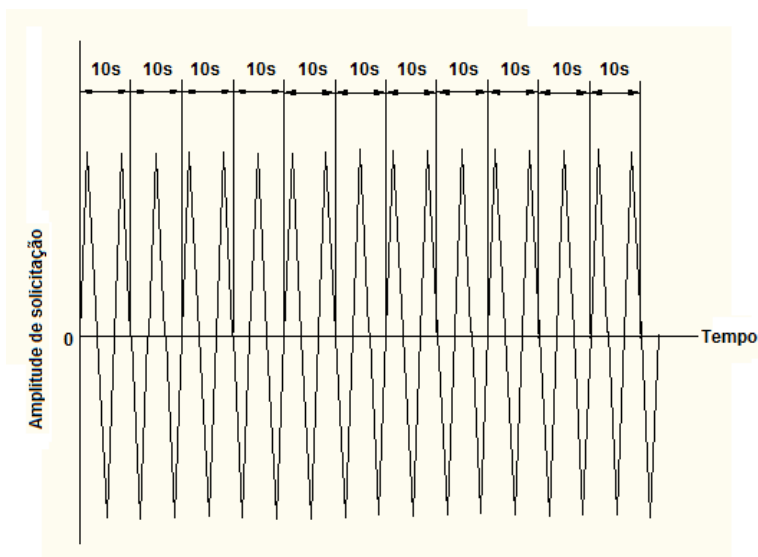


Figura 48 - Captação de dados por múltiplo sequencial.

No início do ensaio de Módulo Complexo os corpos de provas são colocados na máquina, como mostra a Figura 49, aferidos e mantidos por no mínimo seis horas à temperatura inicial de ensaio. Para as demais temperaturas, esse período pode ser reduzido para quatro horas. Para cada temperatura são testadas as quatro variações de frequência.



Figura 49 - Corpos de prova na máquina de ensaio.

O ensaio de Módulo Complexo é realizado a uma deformação controlada de 40 μdef .

Após os ensaios, são feitos os cálculos do módulo complexo (E^*) que é um número definido pela relação entre duas amplitudes, uma amplitude complexa da tensão sinusoidal da pulsação ω aplicada ao material e uma amplitude complexa da deformação sinusoidal que resulta em regime estável. As Equações (4.15), (4.16) e (4.17) determinam o E^* .

$$\sigma(t) = \text{Im}[\sigma_0 \cdot e^{i\omega t}] \quad \text{para} \quad \sigma^*(t) = \sigma_0 \cdot e^{i\omega t} \quad (4.15)$$

$$\varepsilon(t) = \text{Im}[\varepsilon^*(t)] \quad \text{para} \quad \varepsilon^*(t) = \varepsilon_0 \cdot e^{i(\omega t - \varphi)} \quad (4.16)$$

$$E^*(t) = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0 e^{-i\varphi}} = |E^*| e^{i\varphi} \quad (4.17)$$

Onde:

σ, ε	=	valores das amplitudes da tensão e da deformação;
i	=	número complexo ($i^2 = -1$);
$\omega(2\pi f)$	=	pulsção do sinal e f é a frequência da solitação;
σ^*, ε^*	=	valores complexos da tensão e da deformação;
φ	=	ângulo de fase ou defasagem;
$ E^* $	=	módulo complexo ou módulo de rigidez.

O módulo complexo pode ser expresso segundo a Equação (4.18) (RIVIÈRE, 1996).

$$E^* = E_1 + i \cdot E_2 \quad (4.18)$$

Onde:

E^*	=	módulo complexo ou módulo de rigidez;
E_1	=	módulo elástico real (energia que pode ser recuperada);
E_2	=	módulo imaginário (energia perdida);
i	=	número complexo ($i^2 = -1$).

As Equações (4.19) e (4.20) representam as partes real e imaginária do módulo complexo. A energia perdida do módulo E_2 é irreversível devido ao atrito interno no material.

$$E_1 = \gamma \left(\frac{F}{D} \cos \varphi + \mu \omega^2 \right) \quad (4.19)$$

$$E_2 = \gamma \left(\frac{F}{D} \sin \varphi \right) \quad (4.20)$$

Onde:

- E_1 = módulo elástico real (energia que pode ser recuperada);
 E_2 = módulo imaginário (energia perdida);
 γ = fator de forma;
 F = força aplicada para gerar o deslocamento D ;
 D = deslocamento aplicado na base menor dos corpos de prova;
 ϕ = ângulo de fase ou defasagem;
 μ = fator de massa;
 $\omega(2\pi f)$ = pulsação do sinal e f é a frequência da solicitação.

Os resultados experimentais E^* , E_1 , E_2 e ϕ variam com a temperatura e a frequência de solicitações fixadas para cada ensaio. A análise é feita nas representações das curvas Isotérmicas, Equivalência Frequência-Temperatura, Isócronas, Espaço de Black e no Plano Cole-Cole.

As curvas Isotérmicas são obtidas pelo módulo complexo (E^*) em função da frequência e por cada temperatura de ensaio em coordenadas logarítmicas. Essas curvas isotérmicas permitem estimar a susceptibilidade cinética a uma dada temperatura, como mostra a Figura 50.

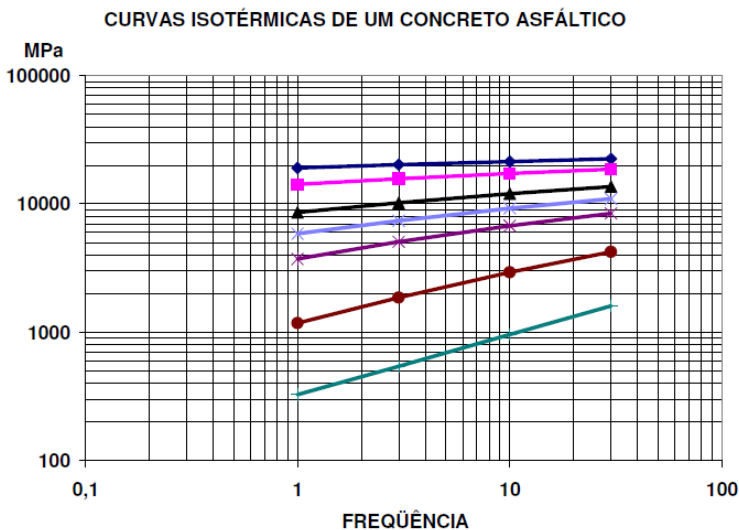


Figura 50 - Curvas Isotérmicas (MOMM, 1998).

As curvas Frequência-Temperatura são obtidas pelo módulo complexo (E^*) em função da frequência, em coordenadas logarítmicas, em uma temperatura de referência (T_R) escolhida arbitrariamente. Assim, é possível construir uma curva com a translação paralela dos eixos das frequências de cada isotérmica. A curva obtida é denominada curva mestra. Esta representação gráfica fornece informações sobre o comportamento viscoelástico dos concretos asfálticos, uma união das curvas que unem pontos com o mesmo valor de módulo do material, como mostra a Figura 51.

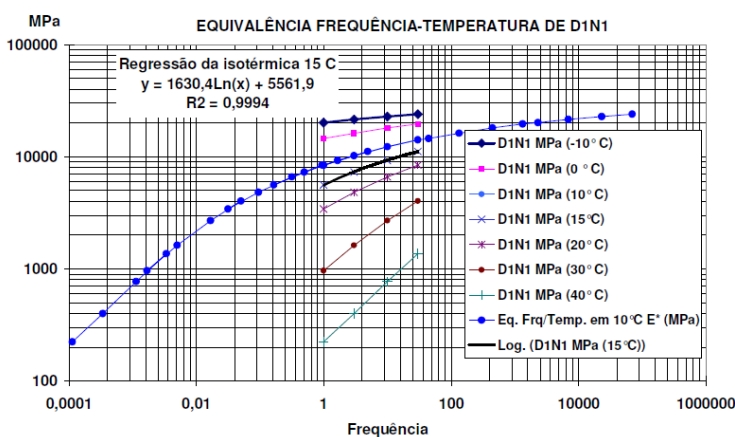


Figura 51 - Curva Equivalência Frequência-Temperatura (MOMM, 1998).

As curvas Isócronas permitem visualizar a diminuição do valor do módulo complexo com o aumento da temperatura, como mostra a Figura 52.

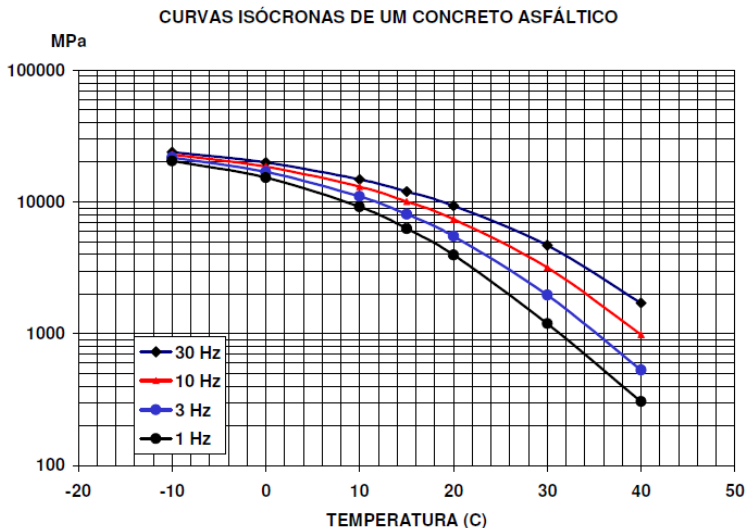


Figura 52 - Curvas Isócronas (MOMM, 1998).

As curvas do Espaço de Black são obtidas pelo módulo complexo (E^*) em função do ângulo de fase (ϕ) em coordenadas logarítmicas. Esta curva permite visualizar os baixos valores de módulo. Nos valores do ângulo de fase maiores é possível notar a influência da temperatura, como mostra a Figura 53. Se a mistura asfáltica obedece ao princípio da equivalência frequência-temperatura, a curva obtida é uma só, ou seja, cada valor da defasagem (ϕ) corresponde a um único valor de módulo complexo (E^*).

Quando a temperatura aumenta, o ângulo de fase (ϕ) também aumenta e o valor de módulo complexo diminui. A representação do Espaço de Balck serve para determinar o módulo E_{inf} utilizado no modelo de Huet-Sayegh.

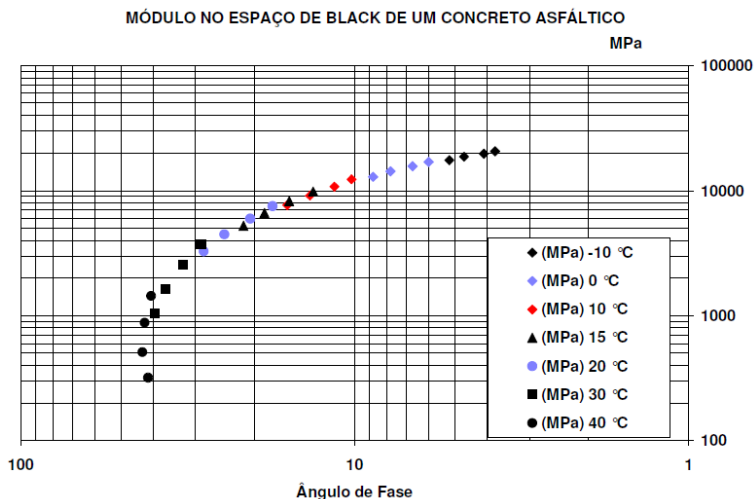


Figura 53 - Espaço de Black (MOMM, 1998).

O Plano Cole-Cole consiste na apresentação dos valores da parte real no eixo das abscissas (E_1) e os valores da parte imaginária no eixo das ordenadas (E_2), como mostra a Figura 54.

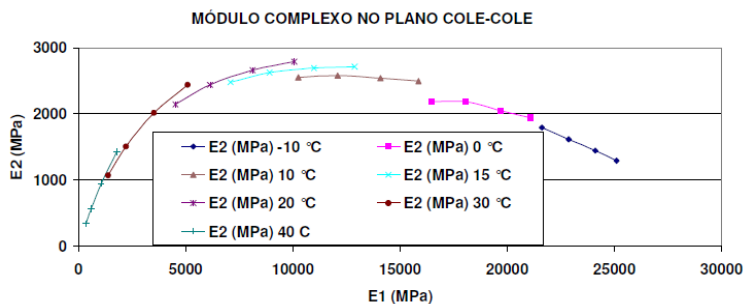


Figura 54 - Plano Cole-Cole (MOMM, 1998).

O estudo desses gráficos possibilita a análise das propriedades mecânicas de rigidez dos concretos asfálticos.

4.6 - ENSAIO DE FADIGA

O fenômeno de fadiga corresponde à deterioração progressiva até a ruptura do material que é dada pela degradação que se apresenta na parte inferior das camadas de base e se propagam para a superfície (RIVIÈRE, 1996).

Em laboratório, existem três maneiras diferentes de realizar o ensaio de fadiga que podem ser por:

- ♦ flexão;
- ♦ tração-compressão;
- ♦ cisalhamento.

Esses ensaios simulam a camada no pavimento submetida a solicitações repetidas. Para a pavimentação asfáltica o ensaio mais apropriado é o ensaio de flexão que reproduz a inversão dos esforços de distensão-contração-distensão.

O ensaio de Fadiga (NF 12697-24+A1, 2007) dessa pesquisa é realizado à flexão alternada em modo contínuo. Em estudos realizados pelo LCPC constatou que a condição mais severa para realizar os ensaios de Fadiga remete-se à temperatura de 10°C e frequência de 25 Hz. São testados vários níveis de deformação correspondentes às amplitudes dos deslocamentos aplicados nos corpos de prova que são escolhidos pelo projetista.

No ensaio de Fadiga o material é submetido a solicitações do tipo senoidal, assim como no ensaio de Módulo Complexo, e esta medida é efetuada no domínio das pequenas deformações na qual o concreto asfáltico se comporta como um material viscoelástico linear (MOMM, 1998).

Existem vários tipos de sinais de carregamentos para o ensaio de Fadiga (senoidal, carregamento cíclico, retangular etc), mas o sinal senoidal é o que mais se aproxima das condições reais em campo (SAÏD, 1988 *apud* BARRA, 2009).

O processo para obtenção do corpo de prova trapezoidal do ensaio de Fadiga segue as mesmas condições do ensaio de Módulo Complexo, visto no item 4.5. O início do processo é idêntico, desde o formato das placas de concreto asfáltico ao condicionamento térmico dos corpos de provas, diferenciando-se nas variações de temperaturas, frequências e análise dos resultados.

A escolha pelo corpo de prova trapezoidal para o ensaio de Fadiga é devido à reprodução da força que se distribui sem afetar a integridade do corpo de prova e faz com que a ruptura por fadiga ocorra fora dos pontos de apoio (base maior) e da aplicação da carga (base menor).

A captação de dados do ensaio de Fadiga é feito por múltiplo programado. São captados 642 pontos e armazenados em pacotes (de 1 segundo) a cada minuto, como mostra a Figura 55.

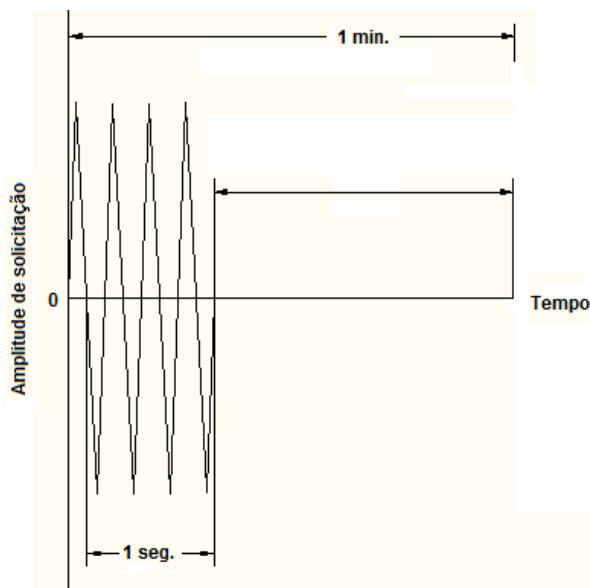


Figura 55 - Captação de dados por múltiplo programado.

Para que se inicie o ensaio de Fadiga os corpos de provas são colocados na máquina, aferidos e mantidos por no mínimo seis horas à temperatura inicial de ensaio para homogeneização, como ocorre no ensaio de Módulo Complexo.

O ensaio de Fadiga é finalizado quando o valor da força registrado no início do ensaio chega à metade, como mostra a Figura 56.

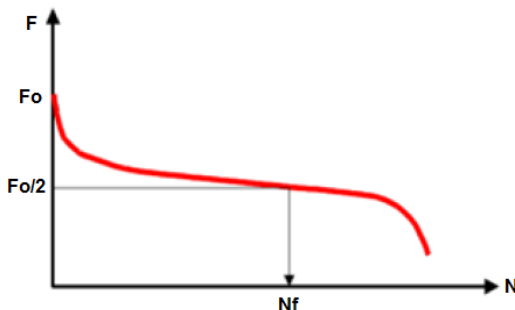


Figura 56 - Definição do número de ciclos de ruptura (QUINTERO, 2011).

O resultado é interpretado pela representação em escala logarítmica da deformação pelo número de ciclos corresponde a cada corpo de prova, indicando o valor da deformação para um milhão de ciclos (ϵ_6) com um grau de confiança de 95%.

A região de ruptura deve estar situada no intervalo que compreende ao terço médio dos corpos de prova trapezoidais. É nessa região que atua o maior momento fletor, ou seja, a zona mais solicitada à fadiga pelas tensões aplicadas durante o ensaio.

Com o auxílio do *software* Excel é possível obter a representação da curva de Fadiga. Conforme a NF P 98-261-1 (1993) a representação gráfica da curva deve ser feita em escala log-log e conter:

- ♦ representação das hipérboles da zona de confiança;
- ♦ indicação da deformação épsilon 6 (ϵ_6);
- ♦ variação do épsilon 6 ($\Delta\epsilon_6$);
- ♦ equação da curva de Fadiga;
- ♦ desvio padrão dos resíduos;
- ♦ características do concreto asfáltico.

O cálculo da hipérbole é feito através de coeficientes da regressão estatística. O valor de N é calculado conforme a Equação (4.21).

$$N = a \cdot \epsilon^{-b} \quad (4.21)$$

Onde:

N = número de aplicações da solicitação;
a e b = constantes;
 ε = deformação.

O cálculo da deformação para um milhão de ciclos (10^6) é feito conforme a Equação (4.22).

$$\varepsilon_6 = 10^{(6-a)/-b} \quad (4.22)$$

O cálculo da zona de confiança é determinado pelas Equações (4.23), (4.24), (4.25), (4.26) e (4.27).

$$\Delta\varepsilon_6 = 0,5 \cdot \varepsilon_6 \cdot 10^{((-2 \cdot \frac{So}{-b}) - (2 \cdot \frac{So}{-b}))} \quad (4.23)$$

$$So = SN * \sqrt{\frac{1}{n} + \frac{(\text{Log}(\varepsilon_0) - \text{Log}(\varepsilon))^2}{(n-1) * S^2(\text{log}(\varepsilon))}} \quad (4.24)$$

$$SN = S(\text{log}(N)) \cdot \sqrt{\frac{((1-R^2)-(n-1))}{(n-2)}} \quad (4.25)$$

$$\text{Log}(N)_{\text{inf}}^{\text{sup}} = No \pm So \quad (4.26)$$

$$N = 10^{(No \pm So)} \quad (4.27)$$

Com o cálculo da representação das hipérboles da zona de confiança através de coeficientes da regressão estatística, é criado o gráfico da curva de fadiga.

CAPÍTULO 5

5 - RESULTADOS E ANÁLISES DOS ENSAIOS LABORATORIAIS

Neste capítulo, são apresentados todos os resultados obtidos nos ensaios laboratoriais dos concretos asfálticos realizados nesta pesquisa: ensaio de dosagem Marshall, ensaio Duriez, ensaio de Deformação Permanente, ensaio de Módulo Complexo e o ensaio de Fadiga.

5.1 - ENSAIO DE DOSAGEM MARSHALL

O ensaio da prensa de compactação por cisalhamento giratório - PCG (NF 98-252, 1999) é o primeiro ensaio a nível empírico pela metodologia francesa de formulação. Devido à falta do equipamento de PCG disponível, o ensaio foi substituído pela dosagem Marshall.

Para todos os ligantes dessa dissertação utilizou-se ligante asfáltico 50/70 tanto convencional como modificado pelo EVA adicionado a um teor de 1,0% de aditivo (Dope). Foi definido para a compactação do ensaio Marshall, 75 golpes para cada face, já que para essa pesquisa, a curva granulométrica apresenta-se entre os limites da curva “C” do DNIT (mistura densa) e a formulação desse concreto asfáltico visa à camada de revestimento. Foi considerado um nível de tráfego $N > 10^6$. Na Figura 57 encontra-se a prensa Marshall.



Figura 57 - Prensa Marshall.

Para o cálculo da formulação do Nível 0 foi escolhido o método do ligante asfáltico interno que correspondente à incorporação desse ligante aos 100% do concreto asfáltico. No Brasil geralmente é utilizado esse procedimento, portanto foi o escolhido para essa pesquisa. O teor de partida foi fixado em 5,0%.

Foi definido mais quatro teores abaixo e quatro teores acima do teor de partida com intervalos de 0,25% entre eles. Os nove teores testados no ensaio Marshall, tanto para os concretos convencionais como para os modificados, foram: 4,0%, 4,25%, 4,5%, 4,75%, 5,0%, 5,25%, 5,5%, 5,75% e 6,0%.

Para os nove teores de cada mistura, foram moldados cinco corpos de prova totalizando noventa corpos de prova (quarenta e cinco para o concreto asfáltico convencional e quarenta e cinco para o concreto asfáltico modificado).

A temperatura de usinagem do concreto asfáltico foi de 170°C (sendo 150°C a temperatura do ligante e a 170°C a temperatura dos

agregados) e a temperatura de compactação foi de 150°C, como mostra a Tabela 12. Esses valores são obtidos através de um gráfico (viscosidade x temperatura) dos resultados da Viscosidade Brookfield.

Tabela 12 - Temperaturas de usinagem e compactação.

Temperatura de usinagem	170°C
♦ Temperatura do ligante	150°C
♦ Temperatura dos agregados	170°C
Temperatura de compactação	150°C

A massa volumétrica real dos granulares (MRVg) encontrada foi de 2,690 g/cm³ para as frações entre 12,5mm e 4,75mm e de 2,700 g/cm³ para as frações entre 2,36mm e 0,075mm. Esses valores foram utilizados para o cálculo das frações dos ensaios Duriez.

No momento da usinagem dos corpos de prova Marshall, os finos (peneiras #0,15, #0,075 e a passante na #0,075) foram separados e misturados após a usinagem dos demais agregados. Isso para que o ligante asfáltico envolvesse de maneira uniforme todos os grãos, visto que os finos possuem uma área específica maior de cobrimento.

A aquisição de dados do ensaio Marshall foi realizada pelo *software* AqDados 7.02, o mesmo utilizado nos ensaios de Fadiga e Módulo Complexo. O sistema conecta-se a uma célula de carga de 100kN e um extensômetro.

O teor ótimo foi definido através da análise de parâmetros físicos, como o teor de vazios, massa específica aparente, vazios cheio com betume (VCB), vazios do agregado mineral (VAM), relação betume-vazios (RBV), estabilidade e fluência.

As médias dos valores encontrados no ensaio Marshall para os teores ótimos estão nas Tabela 13 e Tabela 14.

Tabela 13 - Média dos valores do ensaio Marshall.

	TEOR ÓTIMO	DENSIDADE APARENTE	TEOR DE VAZIOS
CONVENC	4,75	2,399	4,130
EVA	5,00	2,410	3,290

Tabela 14 - Média dos valores do ensaio Marshall.

	VAM (%)	RBV (%)	ESTABI- LIDADE	FLUÊNCIA
CONVENC	15,870	74,870	1616,725	4,060
EVA	15,710	79,220	1421,260	5,480

O teor ótimo é definido analisando os parâmetros em conjunto e que obtiveram os melhores resultados. O teor ótimo encontrado através do ensaio Marshall foi de 4,75% para os concretos asfálticos convencionais e 5,0% para os concretos asfálticos modificados pelo polímero EVA. Isso comprova que é necessário um teor de ligante maior para concretos asfálticos modificados, já que o polímero EVA aumenta a viscosidade do material.

5.2 - ENSAIO DURIEZ

Através do rompimento à compressão direta simples foi avaliada a perda de resistência devido à ação da água nos corpos de provas Duriez. Nessa dissertação o diâmetro máximo utilizado foi de 12,5 mm, portanto, são 12 corpos de prova com massa de 1000g para cada teor de ligante.

Considerando o teor ótimo de 4,75% para o concreto asfáltico convencional e de 5,0% para o concreto asfáltico modificado, foram avaliados mais dois teores, para cada mistura, com intervalos de 0,25% de ligante. Logo, os teores testados no ensaio Duriez foram: 4,50%, 4,75% e 5,0% para os concretos asfálticos convencionais e 4,75%, 5,0% e 5,25% para asfálticos concretos modificados.

Foram moldados 12 corpos de prova para cada teor de ligante asfáltico totalizando 72 corpos de prova, como mostra a Tabela 15. Todos os corpos de prova foram usinados e rompidos no Laboratório de Pavimentação da UFSC e a compactação foi realizada no Laboratório de Materiais de Construção Civil da UFSC.

Tabela 15 - Quantidade total de corpos de prova do ensaio Duriez.

LIGANTE	TEOR (%)	QUANTIDADE DE CORPOS DE PROVA
CONVENCIONAL	4,50	12
	4,75	12
	5,00	12
MODIFICADO	4,75	12
	5,00	12
	5,25	12
	TOTAL	72

A temperatura de usinagem do concreto asfáltico foi de 170°C (sendo 150°C a temperatura do ligante e a 170°C a temperatura dos agregados) e a temperatura de compactação foi de 150°C. Valores estes resultantes do gráfico da Viscosidade Brookfield.

Após a usinagem e a compactação é feito a desmoldagem dos 72 corpos de prova e realizado a aferição das massas e altura média, considerando uma tolerância de 1,0g e 0,1mm respectivamente.

Com os valores da massa total, altura média e os valores calculados de MV_a , os corpos de prova foram divididos em três grupos com características homogêneas, sendo 5 corpos de prova para ensaios sob imersão, 5 corpos de prova para ensaios sem imersão e 2 corpos de prova para a análise da massa volumétrica hidrostática. O fluxograma da Figura 58 mostra o direcionamento dos doze corpos de prova do ensaio Duriez.

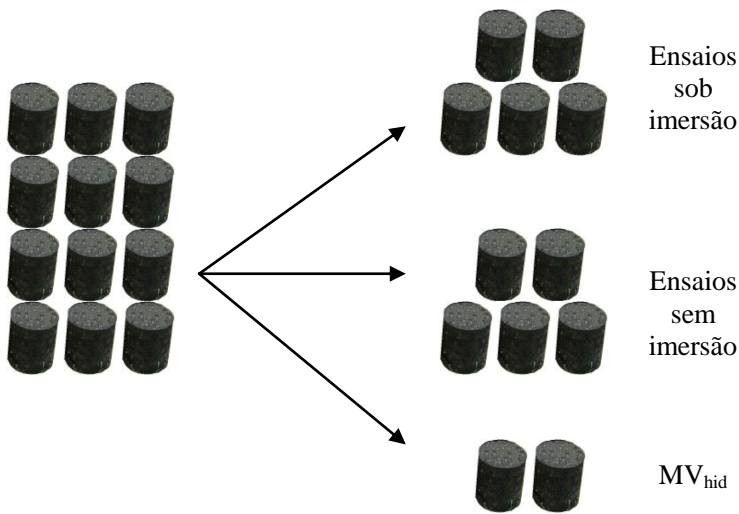


Figura 58 - Direcionamento dos corpos de prova do ensaio Duriez.

A Tabela 16 mostra o teor de vazios obtido através dos valores de MV_a , MV_{hid} e MVR .

Tabela 16 - Massas específicas e teor de vazios do Ensaio Duriez.

LIGANTE	(%)	MV_a (g/cm ³)	MV_{hid} (g/cm ³)	MVR (g/cm ³)	VAZIO (%)
CONVENC.	4,50	2,25	2,36	2,40	6,17
	4,75	2,27	2,37	2,40	5,39
	5,00	2,28	2,38	2,44	4,74
EVA	4,75	2,33	2,41	2,41	3,62
	5,00	2,31	2,38	2,41	4,70
	5,25	2,31	2,39	2,43	4,50

Para a análise dos resultados do ensaio Duriez, é estabelecido o valor mínimo de 0,70 para a relação entre r/R de resistência à compressão (sendo “r”, ensaios sob imersão, e “R”, ensaios sem imersão). Essa relação de 0,70 é definida para curvas granulométricas densas.

Os valores médios da resistência à compressão dos corpos de prova, com imersão e sem imersão em água, e as respectivas relações r/R , encontram-se na Tabela 17.

Tabela 17 - Relação r/R do ensaio Duriez.

LIGANTE (%)	CONDICIONAMENTO	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO (MPa)	r/R
CONVENC	4,50 sem imersão	40,32	0,85
	4,50 com imersão	34,16	
	4,75 sem imersão	41,60	0,98
	4,75 com imersão	40,64	
	5,00 sem imersão	41,70	0,97
	5,00 com imersão	40,60	
EVA	4,75 sem imersão	61,20	0,94
	4,75 com imersão	57,44	
	5,00 sem imersão	55,36	0,97
	5,00 com imersão	53,92	
	5,25 sem imersão	54,68	0,98
	5,25 com imersão	53,50	

Após análise dos resultados verificou-se que todos os teores testados, tanto do concreto asfáltico convencional quanto do concreto asfáltico modificado pelo polímero EVA, foram aprovados e obtiveram relação maior que 0,70 especificada para este ensaio.

Essa tendência de aprovação no ensaio Duriez já era esperada, em função da temperatura da água de imersão ser relativamente baixa e não ser o suficiente para modificar a viscosidade do concreto asfáltico. Logo, para esta condição de temperatura deveria ter um período de

imersão maior para que seja desenvolvido o processo de difusão da água no interior da película do concreto asfáltico formada ao redor dos granulares (BARRA, 2009).

O ensaio de Duriez avalia a perda de resistência devido à ação água, como mostram os resultados de resistência à compressão menores para os corpos de prova sob imersão, mas não possui uma relação direta com os esforços sofridos no pavimento. Geralmente os valores encontrados nesse ensaio são previsíveis e possuem relação entre 0,65 e 1,0 de acordo com o LCP (2007).

5.3 - ENSAIO DE DEFORMAÇÃO PERMANENTE

No ensaio de Deformação Permanente (NF 98-253-1, 1993) foi verificada a resistência dos concretos asfálticos em relação ao afundamento nas trilhas de roda. Oito placas de dimensões 15 cm de largura x 50 cm de comprimento x 5 cm de espessura foram moldadas, sendo quatro placas de concreto asfáltico convencional e outras quatro placas de concreto asfáltico modificado pelo polímero EVA.

O ensaio de Deformação Permanente ocorreu em duas etapas. Na primeira etapa duas placas foram moldadas com teor de 4,75% de ligante asfáltico convencional e duas placas com teor de 5,0% de ligante asfáltico modificado. Na segunda etapa aplicou-se a redução de 0,25% de teor de ligante, sendo duas placas com 4,50% de ligante asfáltico convencional e duas placas com 4,75% de ligante asfáltico modificado. Esses teores de ligante foram escolhidos pois obtiveram resultados satisfatórios no ensaio Duriez.

Para a usinagem das placas na primeira etapa foi utilizado um misturador do Laboratório de Pavimentação da UFSC, como mostra a Figura 59.



Figura 59 - Usinagem no Laboratório de Pavimentação da UFSC.

Já na segunda etapa foi utilizado um misturador do Laboratório de Tecnologia em Pavimentação da Universidade de São Paulo (LTP/EPUSP), como mostra a Figura 60.



Figura 60 - Usinagem no Laboratório de Pavimentação da EPUSP.

Todas as placas compactadas seguiram as normas e especificações da NF 98-250-2 (1991). Depois de compactadas, as placas permaneceram dois dias para o período de cura dos concretos asfálticos, como mostra a Figura 61.



Figura 61 - Placas de Deformação Permanente em repouso.

A pesagem hidrostática das placas do ensaio de Deformação Permanente, Figura 62, foi realizada no Laboratório de Materiais de Construção Civil da UFSC. A massa específica volumétrica hidrostática (MVhid) foi comparada com a massa específica volumétrica real (MVR) para a obtenção do teor de vazios das placas.

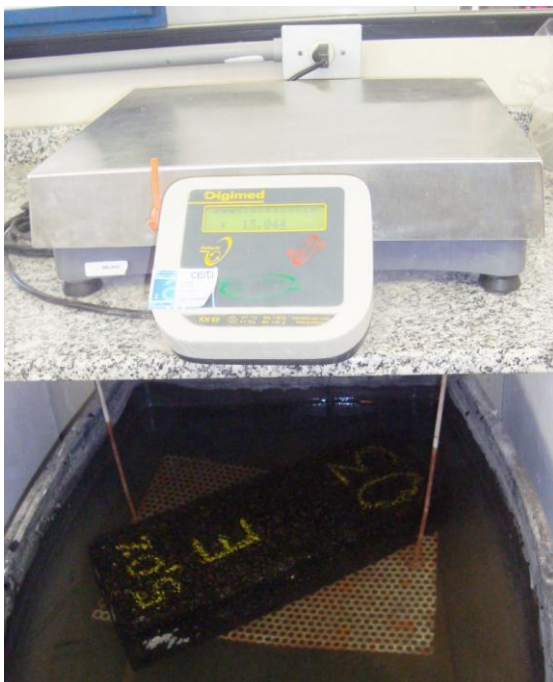


Figura 62 - Pesagem hidrostática das placas de Deformação Permanente.

Na primeira etapa de testes com teores de 4,75% e 5,0% de ligante asfáltico convencional e ligante asfáltico modificado respectivamente, as quatro placas não resistiram ao ensaio de Deformação Permanente. Como ultrapassam 15% da medida inicial, os ensaios foram interrompidos.

As placas de concreto convencional afundaram 16% com 6.000 ciclos e as placas modificadas com EVA afundaram 16% em 8.000 ciclos. Mesmo não sendo aprovadas nessa primeira etapa, pode-se dizer que o polímero EVA fez com que o concreto asfáltico modificado resistisse um número de ciclos maior que o concreto asfáltico convencional para um mesmo afundamento.

Já na segunda etapa todas as placas foram aprovadas no ensaio de Deformação Permanente, como mostra a Figura 63, onde o teor de ligante foi diminuído em 0,25%. As quatro placas resistiram 30.000 ciclos deformando menos de 10%, como estabelece a norma do LCP (2007).



Figura 63- Deformação Permanente de 2,0% nas placas de EVA com 30.000 ciclos.

Os resultados do ensaio de Deformação Permanente nas duas etapas com a porcentagem de afundamentos médios e número de ciclos encontram-se na Tabela 18.

Tabela 18 - Resultados do ensaio de Deformação Permanente.

ETAPA	LIGANTE	TEOR DE LIGANTE (%)	AFUNDAMENTO MÉDIO (%)	Nº DE CICLOS
1º	Convenc.	4,75	16	6.000
	EVA	5,00	16	8.000
2º	Convenc.	4,50	8	30.000
	EVA	4,75	2	30.000

O resultado do ensaio de Deformação Permanente foi satisfatório pois a espessura final não ultrapassou 10% da espessura inicial.

5.4 - ENSAIO DE MÓDULO COMPLEXO

Os ensaios de Módulo Complexo, juntamente com a o ensaio de Fadiga, são responsáveis pela definição das características dos concretos asfálticos necessárias ao dimensionamento de pavimentos. O ensaio foi realizado no Laboratório de Pavimentação da UFSC de acordo com os critérios normativos franceses.

O processo de triagem é realizado em função das dimensões e o teor de vazios após o intervalo de cura dos corpos de prova trapezoidais. O processo de triagem é mostrado na Figura 64.



Figura 64 - Triagem dos corpos de provas trapezoidais.

Os corpos de provas são rejeitados quando não se encontram dentro dos limites das dimensões especificados pela norma, como mostrado na Tabela 11, ou estão fora dos limites do teor de vazios admissíveis.

Na preparação do ensaio de Módulo Complexo os corpos de prova foram colados com epóxi Araldite[®] (resina + endurecedor) nos suportes metálicos de base menores e maiores, como mostra a Figura 65.

Depois de colados, foram apoiados em uma estrutura de madeira e repousados por 24 horas.



Figura 65 - Corpos de prova trapezoidal colados.

Nesta pesquisa, os valores para temperaturas de ensaio foram de -10°C , 0°C , 10°C , 15°C , 20°C , 30°C e 40°C e frequências de 1Hz, 3Hz, 10Hz e 30Hz para cada temperatura. Geralmente são utilizados esses valores e, portanto, escolhidos para que seja possível realizar comparações dos resultados obtidos com os demais trabalhos.

Foram utilizados quatro corpos de prova trapezoidais com teor de 4,75% de ligante asfáltico convencional e mais quatro corpos de prova com teor de 5,0% de ligante asfáltico modificado pelo polímero EVA.

Os resultados do volume de vazios, do K_E , do K_{σ} , da flecha e da amplitude que foram calculados no processo de triagem dos concretos asfálticos convencionais e concretos asfálticos modificados, são mostradas na Tabela 19 e na Tabela 20 respectivamente.

concreto asfáltico convencional.

CP	V(%)	K ϵ	K σ	Flecha (μ m)	Amplitude (μ m)
1.7	2,24	0,0008842	0,0135606		
2.11	3,90	0,0008853	0,0136802	45,1	90,1
2.2	2,53	0,0008883	0,0131697		
2.7	3,44	0,0008921	0,0135037		

Tabela 20 - Parâmetros para o Módulo Complexo do concreto asfáltico modificado pelo EVA.

CP	V(%)	K ϵ	K σ	Flecha (μ m)	Amplitude (μ m)
2.16	2,19	0,0009079	0,0130294		
1.19	4,18	0,0009113	0,0125121	43,9	87,8
1.15	3,44	0,0009124	0,0126481		
2.10	4,06	0,0009124	0,0130198		

Os resultados obtidos no ensaio de Módulo Complexo para o concreto asfáltico convencional e concreto asfáltico modificado pelo polímero EVA encontram-se na Tabela 21 e na Tabela 22 respectivamente. Os valores de E^* , E_1 , E_2 e ϕ variam com a temperatura e a frequência de solicitações fixadas para cada ensaio.

Tabela 21 - Resultados do ensaio de Módulo Complexo do

concreto asfáltico convencional.

TEMP. (°C)	FREQ. (Hz)	E* (MPa)	E1 (MPa)	E2 (MPa)	Φ (°)
-10	30	15129	15114	668	2,5
-10	10	15051	15034	692	2,6
-10	3	14646	14623	821	3,2
-10	1	14116	14084	949	3,9
0	30	14770	14743	902	3,50
0	10	13921	13878	1087	4,4
0	3	13240	13185	1252	5,2
0	1	12799	12729	1338	6,0
10	30	12050	11947	1573	7,5
10	10	10636	10487	1761	9,6
10	3	9572	9393	1831	11,0
10	1	8494	8260	1978	13,5
15	30	10399	10228	1877	10,4
15	10	9721	9531	1910	11,3
15	3	8444	8181	2089	14,3
15	1	6814	6467	2144	18,3
20	30	8860	8610	2091	13,6
20	10	7630	7337	2089	15,8
20	3	6186	5798	2151	20,3
20	1	4912	4480	2012	24,1
30	30	4760	4282	2079	25,9
30	10	3974	3448	1975	29,8
30	3	2744	2236	1589	35,4
30	1	2001	1551	1263	39,2
40	30	2288	1778	1440	39,0
40	10	1949	1504	1240	39,5
40	3	1573	1162	1061	42,4
40	1	1050	822	654	38,5

Tabela 22 - Resultados do ensaio de Módulo Complexo do

concreto asfáltico modificado pelo EVA.

TEMP. (°C)	FREQ. (Hz)	E* (MPa)	E1 (MPa)	E2 (MPa)	PHI (°)
-10	30	13598	13593	349	1,5
-10	10	13132	13122	489	2,2
-10	3	12796	12779	626	2,9
-10	1	12407	12387	688	3,3
0	30	12248	12232	641	3,0
0	10	12098	12075	725	3,5
0	3	11477	11445	861	4,3
0	1	10830	10785	984	5,3
10	30	10486	10437	1005	5,5
10	10	10033	9960	1205	6,9
10	3	9180	9073	1393	8,7
10	1	8236	8074	1614	11,4
15	30	9457	9353	1398	8,5
15	10	8794	8651	1575	10,3
15	3	8012	7823	1732	12,5
15	1	6742	6503	1779	15,3
20	30	7498	7300	1712	13,2
20	10	7116	6893	1765	14,4
20	3	5942	5665	1788	17,6
20	1	4904	4598	1700	20,5
30	30	5231	4903	1823	20,4
30	10	4233	3854	1748	24,5
30	3	3207	2858	1456	27,0
30	1	2486	2190	1175	28,3
40	30	2591	2244	1296	30,0
40	10	1999	1688	1070	32,5
40	3	1592	1375	803	30,3
40	1	1384	1244	607	26,0

Dos valores encontrados no ensaio de Módulo Complexo, o valor de E^* a 15°C e 10 Hz são mais importantes, pois são utilizados no dimensionamento do pavimento. Para o concreto asfáltico convencional o valor de E^* (15°C, 10 Hz) é de 9.721 MPa e para o concreto asfáltico modificado pelo EVA o valor de E^* (15°C, 10 Hz) é de 8.794 MPa.

Para poder analisar os dados do ensaio de Módulo Complexo são gerados gráficos nas representações das curvas Isotérmicas, Equivalência Frequência-Temperatura, Isócronas, Espaço de Black e no Plano Cole-Cole.

5.4.1 - Curvas Isotérmicas

As curvas Isotérmicas foram obtidas pelo Módulo Complexo (E^*) em função da frequência e por cada temperatura de ensaio em coordenadas logarítmicas. Na Figura 66 encontram-se as curvas Isotérmicas do concreto asfáltico convencional e na Figura 67, as curvas do concreto asfáltico modificado pelo EVA.

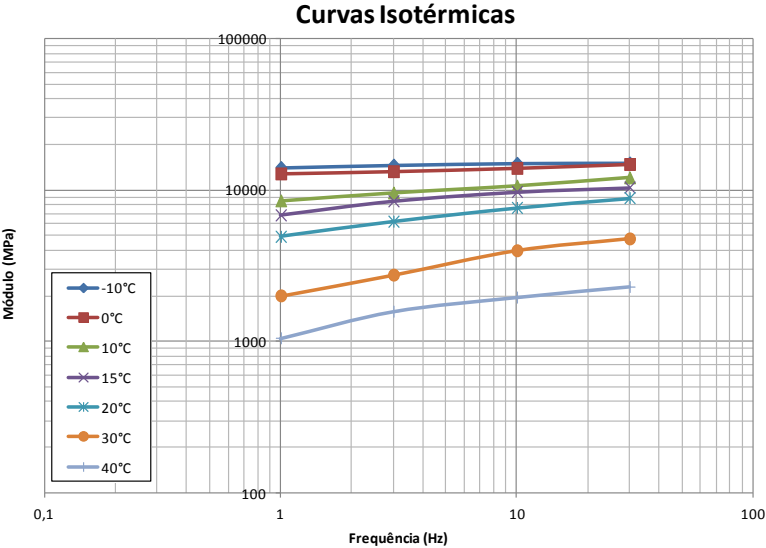


Figura 66 - Curvas Isotérmicas do concreto asfáltico convencional.

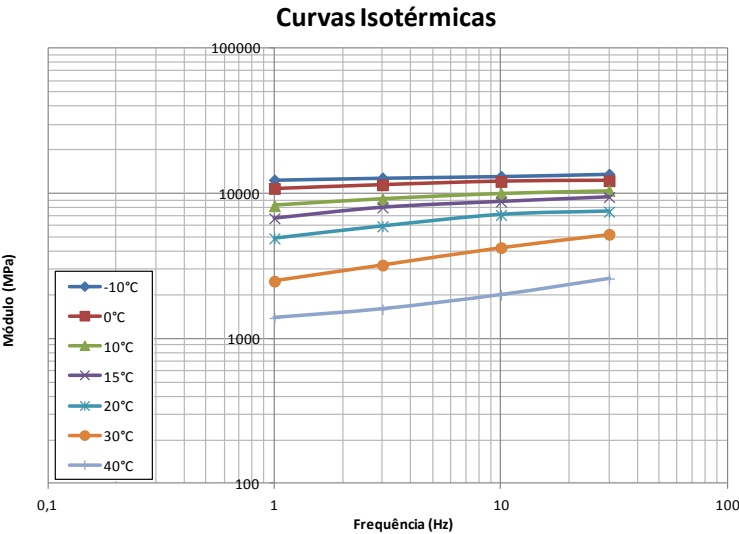


Figura 67 - Curvas Isotérmicas do concreto asfáltico modificado.

Ambos os concretos tiveram comportamentos semelhantes, visto uma proximidade das curvas de -10°C , 0°C , 10°C , 15°C e 20°C . À medida que as temperaturas de ensaio aumentam, os valores de Módulo diminuem. Os baixos valores de Módulo para as curvas Isotérmicas estão representadas pelas temperaturas de 30°C e 40°C , ou seja, quanto maior a temperatura mais susceptível torna-se o pavimento.

Nas baixas frequências de aplicação da carga os valores do Módulo são mais dispersos, tornando-os susceptíveis as diferentes temperaturas. Já a altas frequências, como em 30 Hz, a dispersão entre os valores de Módulo é um pouco menor, ou seja, em velocidades rápidas de aplicação de carga a influência da temperatura é menor.

5.4.2 - Curvas Equivalência Frequência-Temperatura

As curvas Equivalência Frequência-Temperatura são obtidas pelo Módulo Complexo (E^*) em função da frequência, em coordenadas logarítmicas, em uma temperatura de referência (T_R). A T_R escolhida para essa pesquisa foi de 15°C .

Na Figura 68 encontram-se as curvas Equivalência Frequência-Temperatura do concreto asfáltico convencional e na Figura 69 as curvas Equivalência Frequência-Temperatura do concreto asfáltico modificado pelo EVA.

As tabela com os parâmetros para gerar a curva de Equivalência Frequência-Temperatura do concreto asfáltico convencional e concreto asfáltico modificado pelo polímero EVA encontram-se no Apêndice 4.

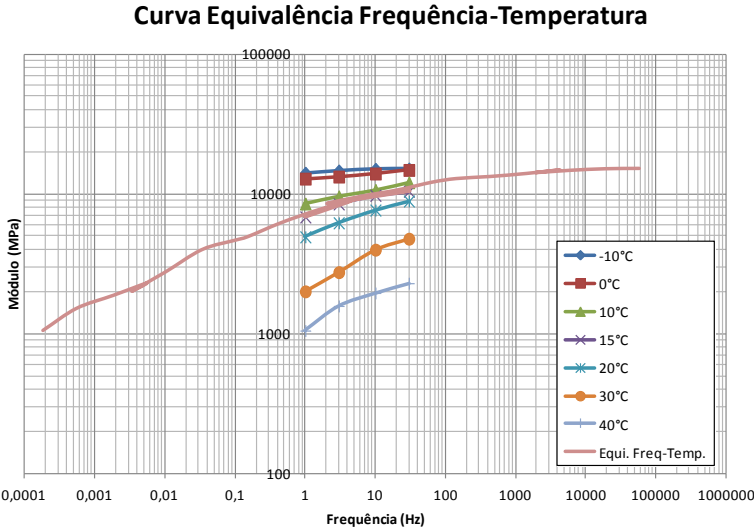


Figura 68 - Curva Equivalência do concreto asfáltico convencional.

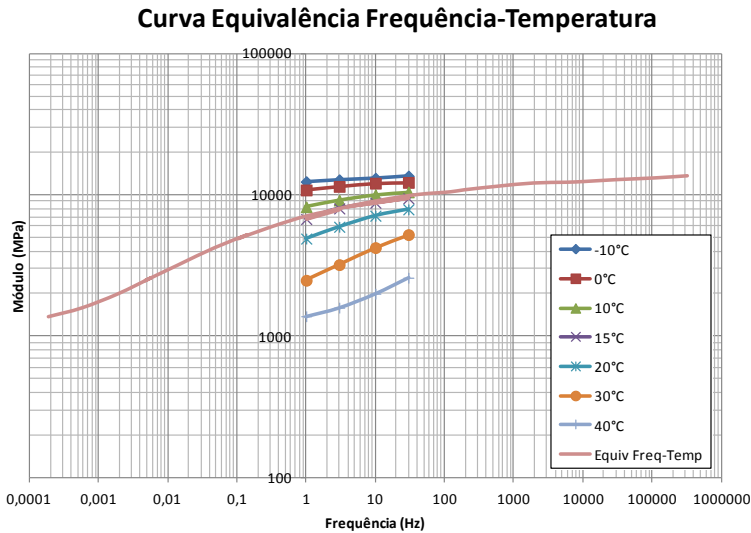


Figura 69 - Curva Equivalência do concreto asfáltico modificado.

A curva mestra foi obtida pela translação paralela dos eixos das frequências de cada isotérmica. Esta representação gráfica fornece informações sobre o comportamento viscoelástico dos concretos asfálticos que unem pontos com o mesmo valor de módulo do material.

5.4.3 - Curvas Isócronas

As curvas Isócronas foram obtidas pelo Módulo Complexo (E^*) em função da temperatura e por cada frequência de ensaio em coordenadas semi-logarítmicas. Na Figura 70 encontram-se as curvas Isócronas do concreto asfáltico convencional e na Figura 71, as curvas do concreto asfáltico modificado pelo EVA.

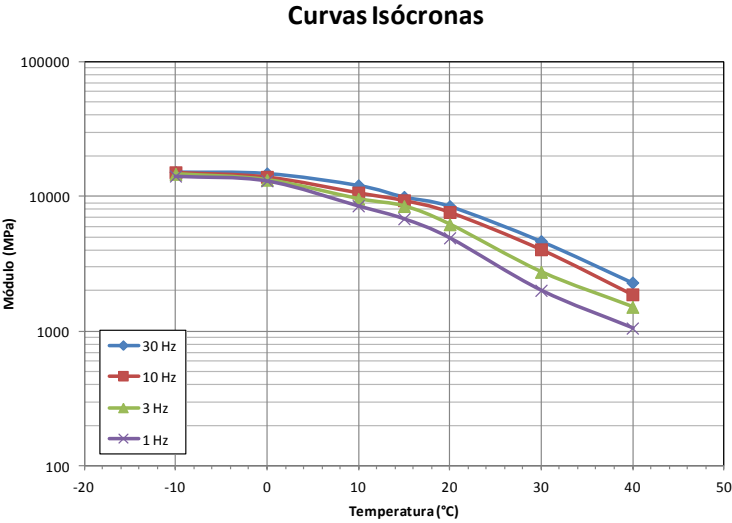


Figura 70 - Curvas Isócronas do concreto asfáltico convencional.

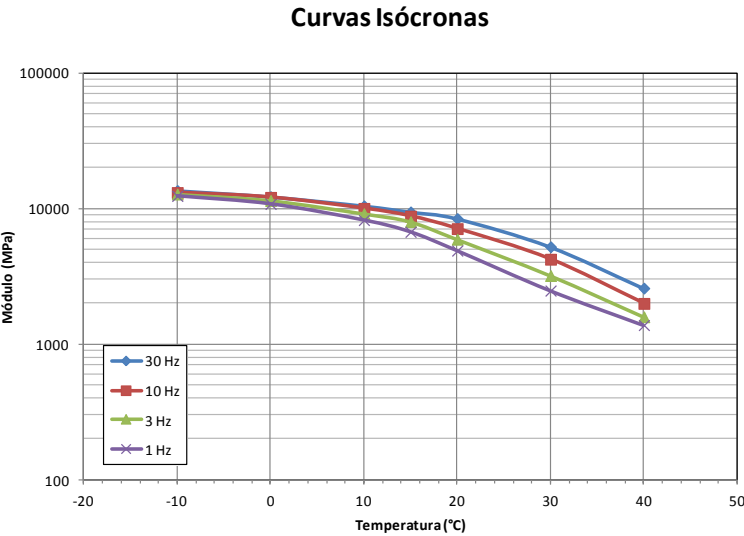


Figura 71 - Curvas Isócronas do concreto asfáltico modificado.

Assim como nas curvas Isotérmicas, as curvas Isócronas também tiveram comportamentos semelhantes, visto o formato das curvas que conforme o aumento da temperatura de ensaio o valor do módulo diminui.

Nas temperaturas mais baixas, a influência da frequência de aplicação das cargas é indiferente, visto que os valores de módulo para todas as frequências são próximas. Já nas temperaturas acima de 10°C, a dispersão dos resultados é evidente. Entre todas as temperaturas, verifica-se uma maior influência na temperatura a 30°C nas diferentes frequências de ensaio.

5.4.4 - Curvas do Espaço de Black

As curvas do Espaço de Black são obtidas pelo Módulo Complexo (E^*) em função do ângulo de fase (φ) em coordenadas semi-logarítmicas. Na Figura 72 encontram-se as curvas do Espaço de Black do concreto asfáltico convencional e na Figura 73 as curvas do Espaço de Black do concreto asfáltico modificado pelo EVA.

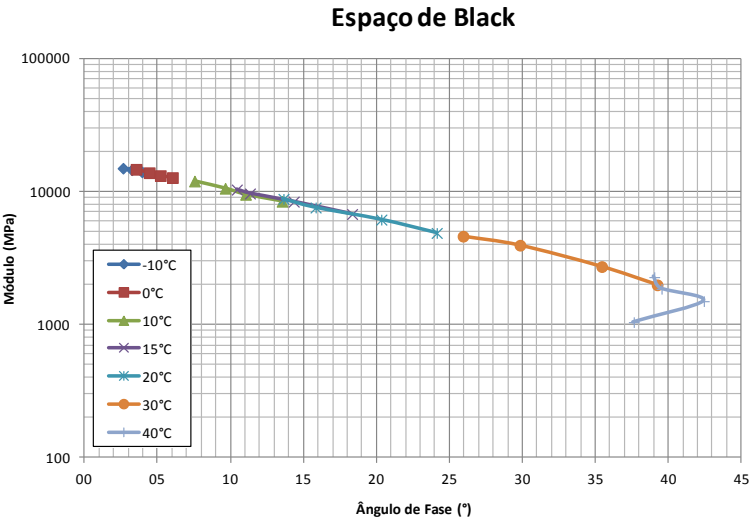


Figura 72 - Espaço de Black do concreto asfáltico convencional.

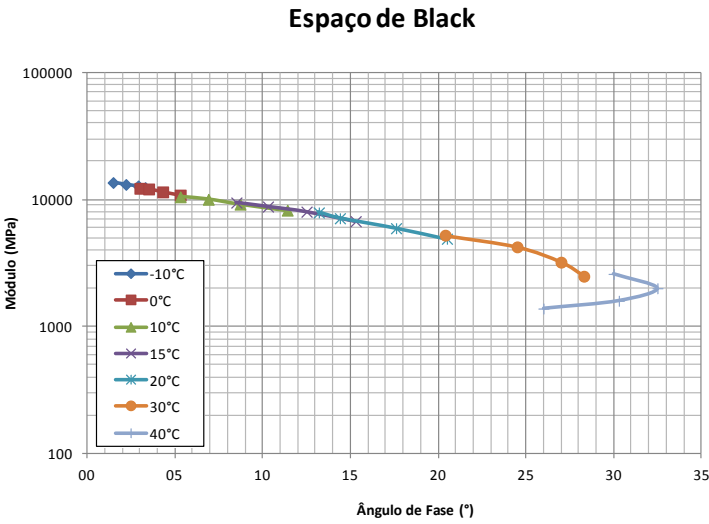


Figura 73 - Espaço de Black do concreto asfáltico modificado.

Os comportamentos dos concretos asfálticos foram semelhantes com a diminuição dos valores de módulo à medida que há um aumento de temperatura e aumento do ângulo de fase.

Os valores de ângulo de fase aumentam conforme há um aumento na temperatura, ou seja, há uma maior defasagem (perda de energia) a altas temperaturas do que em baixas temperaturas.

Nos valores do ângulo de fase maiores é possível notar uma maior influência da temperatura. Quanto maior a temperatura, maior é a dispersão dos valores do ângulo de fase. Nota-se que a baixas temperaturas, os valores de ângulo são próximos tanto nos concretos asfálticos convencionais como nos concretos asfálticos modificados.

5.4.5 - Plano Cole-Cole

O Plano Cole-Cole foi obtido pelos valores da parte real elástica (E_1) no eixo das abscissas e os valores da parte imaginária viscosa (E_2) no eixo das ordenadas. Na Figura 74 encontra-se o Plano Cole-Cole do concreto asfáltico convencional e na Figura 75, do concreto asfáltico modificado pelo EVA.

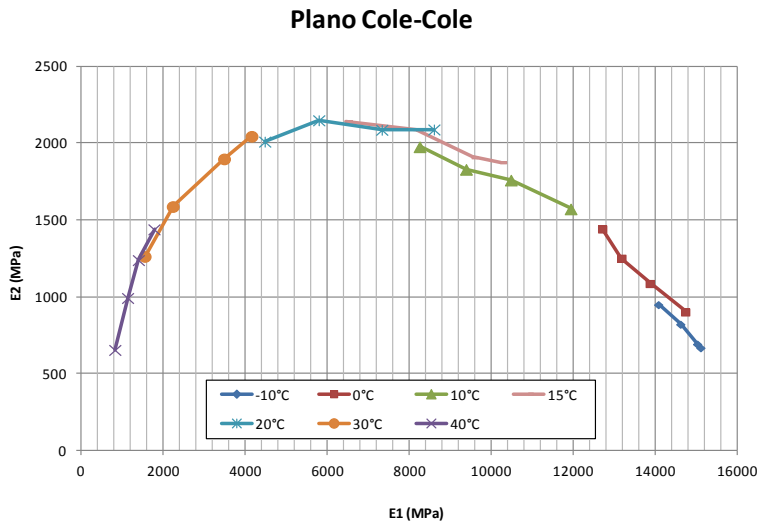


Figura 74 - Plano Cole-Cole do concreto asfáltico convencional.

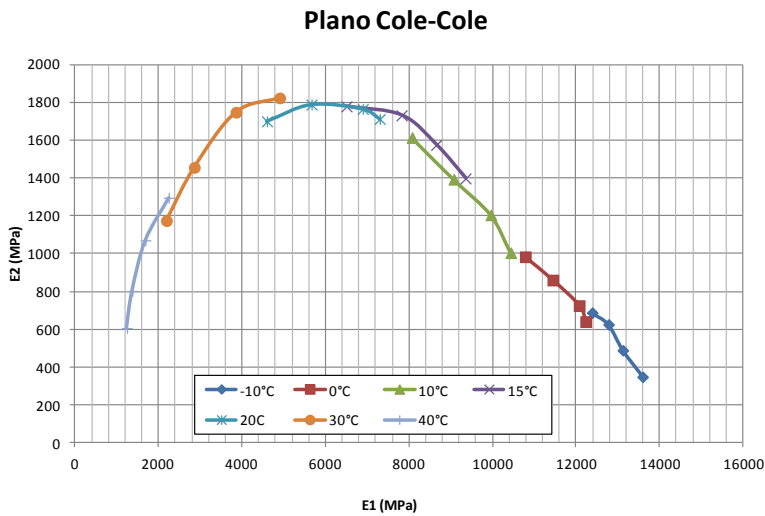


Figura 75 - Plano Cole-Cole do concreto asfáltico modificado.

É possível notar que os comportamentos dos concretos são semelhantes, ou seja, quanto menor a temperatura de ensaio, maior é o valor elástico do material. Já para o valor de módulo viscoso, há um valor máximo para as temperaturas de 20°C, tanto para o concreto asfáltico convencional como para o concreto asfáltico modificado pelo polímero EVA.

5.5 - ENSAIO DE FADIGA

No ensaio de Fadiga foi testada a deterioração progressiva até à ruptura do concreto asfáltico. Foram extraídos quarenta corpos de prova das placas de ligante asfáltico 50/70 convencional e desses, trinta e dois passaram pela triagem. Já nas placas de ligante asfáltico 50/70 modificadas pelo polímero EVA foram extraídos quarenta corpos de prova e trinta passaram pela triagem.

São utilizados vinte e quatro corpos de prova por ensaio de Fadiga, divididos em três grupos de oito unidades. Os ensaios foram realizados a 120, 150 e 180 microdeformações (μdef) máximas tanto para os concretos asfálticos convencionais quanto para os concretos asfálticos modificados pelo EVA.

O primeiro ensaio é realizado a 150 μdef , pois geralmente é nessa deformação que se atinge um milhão (10^6) de ciclos. A partir dessa etapa são definidas as demais deformações de ensaio para a obtenção da curva de Fadiga.

Após o ensaio na máquina de Fadiga, são verificadas as regiões de ruptura dos corpos de prova trapezoidais. Todos foram aprovados nesse quesito, pois a região de ruptura estava fora dos pontos de apoio (base maior) e da aplicação da carga (base menor), como mostra a Figura 76.

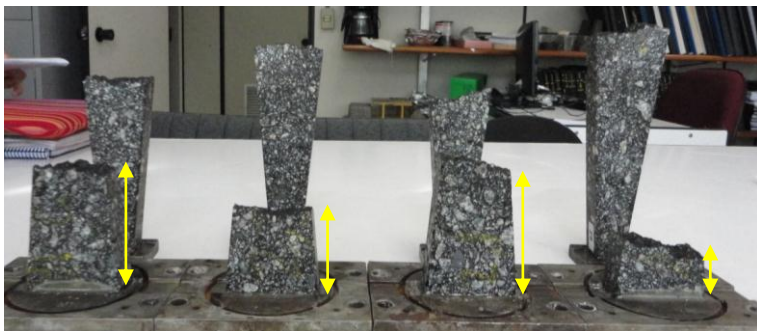


Figura 76 - Zona de ruptura do corpo de prova.

A análise da região de ruptura é realizada observando as superfícies de falhas que podem ser apresentadas de três maneiras, podendo ser por coesão do ligante asfáltico (quando a fissura ocorre no próprio ligante), por adesão (descolamento na interface granular/ligante) e por coesão do granular (quebra do granular) (CASTAÑEDA, 2004).

Para a análise da região de ruptura foi utilizado o corpo de prova trapezoidal da

Figura 77. Na região “A” houve um descolamento do ligante ao redor do granular (observa-se o granular e os resíduos de ligante), na região “B” houve ruptura no próprio ligante asfáltico (observa-se apenas o ligante) e na região “C” houve a ruptura do material granular (granular rompido ao meio).

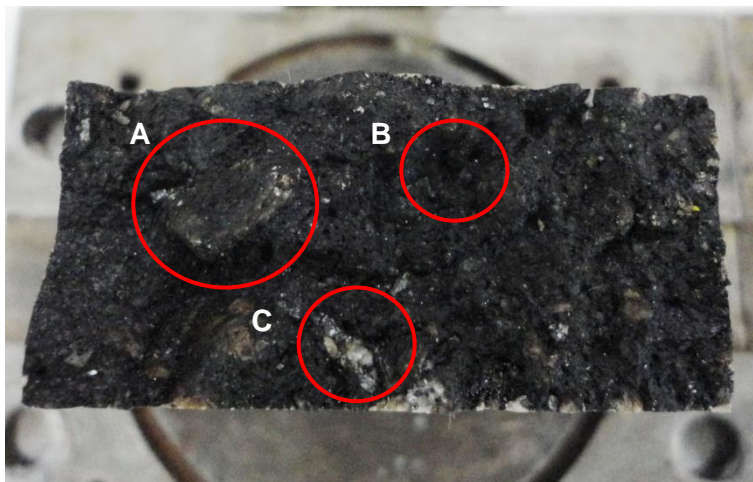


Figura 77 - Regiões de ruptura do corpo de prova trapezoidal.

Após a finalização dos ensaios e análise das regiões de ruptura, é calculada a curva de Fadiga inserida na hipérbole de confiança. Para obter o número de ciclos corresponde ao momento da ruptura, o número de pacotes gerados pelo aquisitor de dados é multiplicado por 25 (Hz) e por 60 (segundos).

Nas Tabela 23 e Tabela 24 encontram-se os resultados dos ensaios de Fadiga dos concretos asfálticos convencionais e concretos asfálticos modificados pelo polímero EVA, respectivamente. Nas tabelas consta a numeração do corpo de prova, a deformação de ensaio, o teor de vazios, o valor de $K\varepsilon$ e o número de ciclos.

Tabela 23 - Resultados do ensaio de Fadiga do concreto asfáltico convencional.

Nº CP	µDEF	TEOR VAZIOS (%)	K _f (10 ⁻³ cm ⁻¹)	Nº CICLOS
2.4	150	3,85	0,0008933481	616.500
2.12		2,96	0,0008943181	951.000
2.13		2,56	0,0008944078	1.153.500
2.19		3,39	0,0008952351	1.114.500
2.8	150	3,15	0,0008966403	1.161.000
2.18		2,92	0,0008976234	2.209.500
2.3		2,84	0,0008967660	1.755.000
1.4	120	3,04	0,0009024070	4.320.000
1.3		3,48	0,0009028087	4.693.500
2.10		2,62	0,0009059481	1.528.500
2.16		3,84	0,0009067792	5.335.500
1.10	120	3,22	0,0009039647	12.132.000
1.20		2,77	0,0009043212	2.425.500
1.17		3,08	0,0009069020	11.335.500
1.19		2,53	0,0009080461	1.158.000
2.17	180	2,50	0,0008976469	450.000
2.5		2,64	0,0008981838	385.500
2.10		2,62	0,0009059481	853.500
2.14		3,91	0,0009003627	690.000
2.9	180	3,10	0,0008987891	801.000
2.15		2,48	0,0008991465	486.000
1.16		3,12	0,0009007253	1.356.000
1.15		2,48	0,0009011371	709.500

O corpo de prova 2.1 no ensaio a 150 µdef foi rejeitado devido a um erro durante a aquisição de dados do ensaio.

Tabela 24 - Resultados do ensaio de Fadiga do concreto asfáltico modificado pelo EVA.

Nº CP	µDEF	TEOR VAZIOS (%)	K _ε (10 ⁻³ cm ⁻¹)	Nº CICLOS
1.9	150	3,01	0,000880746	1.482.000
2.1		2,32	0,000885425	1.272.000
2.7		1,99	0,000892138	1.080.000
1.13		3,34	0,000892754	2.970.000
1.6	150	3,65	0,000896226	1.986.000
1.17		2,64	0,000897237	1.896.000
2.14		2,25	0,000898050	4.623.000
2.18		2,62	0,000898123	1.114.500
1.14	120	1,82	0,000882947	8.506.500
2.6		2,57	0,000892031	6.891.000
2.15		2,71	0,000915289	4.890.000
2.2		3,83	0,000915434	3.837.000
2.16	120	2,19	0,000907852	12.075.000
1.19		4,18	0,000911323	1.896.000
1.15		3,44	0,000912412	13.359.000
2.1		4,06	0,000912458	1.113.000
2.15	180	2,92	0,000898435	1.696.500
2.12		2,29	0,000901023	453.000
2.17		2,16	0,000903656	960.000
2.9		2,78	0,000904185	1.684.500
1.12	180	3,70	0,000901086	1.264.500
1.5		3,93	0,000903558	307.500
1.16		3,11	0,000904613	2.941.500
1.3		3,94	0,000906477	877.500

Para os cálculos da curva de Fadiga foram utilizados os coeficientes da regressão estatística, Tabela 25, dos concretos asfálticos convencionais e modificados pelo polímero EVA. A curva de Fadiga é

constituída por regressão linear entre os logaritmos decimais do número de ciclos (N) e os logaritmos decimais da deformação. A curva de Fadiga possui um intervalo de 95% de confiança.

Tabela 25 - Coeficientes da regressão estatística.

COEFICIENTES	CONVENCIONAL	EVA
a	6,73E+15	6,47E+14
b	-4,4507	-3,9114
Log(a)	15,8281	14,8109
R ²	0,6333	0,4762
n	23	24

Os valores de N e o valores de ϵ_6 foram calculados conforme as Equações 4.14 e 4.15 respectivamente e os resultados encontram-se na Tabela 26 .

Tabela 26 - Valores de N e de ϵ_6 .

CONCRETO ASFÁLTICO	N	ϵ_6 (10 ⁻⁶)
CONVENC.	$6,73E+15 \cdot \epsilon^{-4,4507}$	161,51
EVA	$6,47E+14 \cdot \epsilon^{-3,9114}$	178,90

Nas Figura 78 e Figura 79 encontram-se as curvas de Fadiga do concreto asfáltico convencional e concreto asfáltico modificado pelo polímero EVA respectivamente, contendo a representação das hipérboles da zona de confiança, a equação da curva de Fadiga, a indicação da deformação épsilon 6 (ϵ_6), a variação do épsilon 6 ($\Delta\epsilon_6$), o desvio padrão dos resíduos e as características do concreto asfáltico.

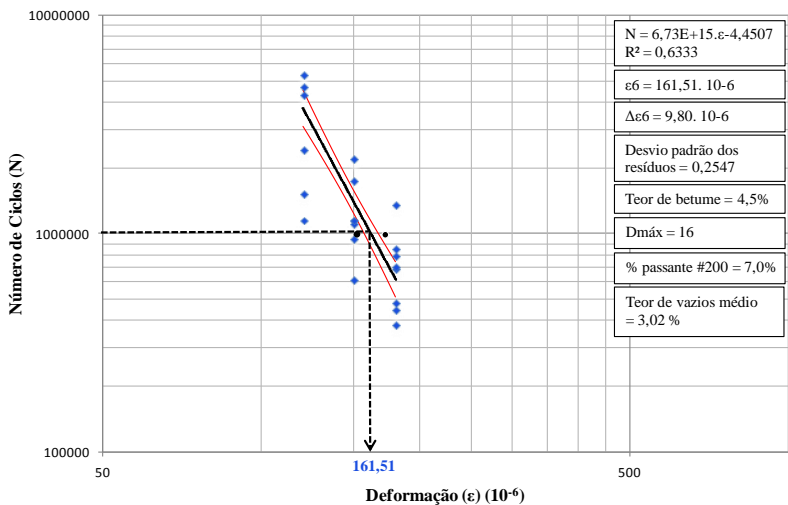


Figura 78 - Curva de Fadiga do concreto asfáltico convencional.

A deformação de ϵ_6 resultou em um valor maior, se comparado a outros estudos realizados com concreto asfáltico convencional. Esse valor pode ter sido gerado por algum problema na máquina ou no tipo de cola utilizado para fixação do corpo de prova.

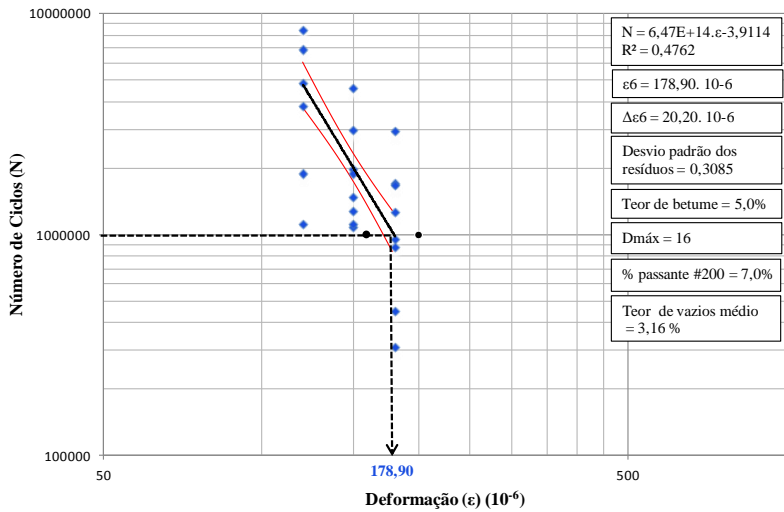


Figura 79 - Curva de Fadiga do concreto asfáltico modificado pelo polímero EVA.

A dispersão dos resultados do ensaio de Fadiga, principalmente na deformação de 180 µdef do concreto asfáltico modificado, pode ser justificada pelos diferentes tipos de ruptura, como visto na

Figura 77, onde ocorre a dispersão do comportamento dos concretos asfálticos e nas superfícies de ruptura.

O número de ciclos necessários para a ruptura, geralmente encontra-se próximo a um milhão (10^6) de ciclos, logo, o valor de deformação ϵ_6 representa a deformação admissível utilizada no dimensionamento do pavimento, que será visto no Capítulo 6.

Os parâmetros para o cálculo da curva de Fadiga e as hipérboles de confiança encontram-se no Apêndice 5.

5.6 - ANÁLISE DOS RESULTADOS

No item anterior foram apresentados os resultados dos ensaios de dosagem Marshall, ensaio Duriez, ensaio de Deformação Permanente, ensaio de Fadiga e o ensaio de Módulo Complexo. Neste item são apresentadas as análises desses resultados obtidos nos ensaios

laboratoriais. No total desta pesquisa foram moldados 162 corpos de provas cilíndricos e 12 placas.

5.6.1 - Ensaio de dosagem Marshall

A curva granulométrica utilizada nessa pesquisa encontra-se entre os limites da curva “C” do DNIT (mistura densa) visando à camada de revestimento. A temperatura de usinagem do concreto asfáltico foi de 170°C e a temperatura de compactação foi de 150°C.

No ensaio Marshall foram testados os teores de 4%, 4,25%, 4,5%, 4,75%, 5%, 5,25%, 5,5%, 5,75% e 6%, obtendo como teor ótimo de 4,75% para o concreto asfáltico convencional e de 5,0% para o concreto asfáltico modificado pelo EVA. Esses teores foram definidos a partir de análises dos parâmetros físicos em conjunto, como o teor de vazios, massa específica aparente, vazios cheio com betume (VCB), vazios do agregado mineral (VAM), relação betume-vazios (RBV), estabilidade e fluência.

O teor ótimo encontrado através do ensaio Marshall foi de 4,75% para os concretos asfálticos convencionais e 5,0% para os concretos asfálticos modificados pelo polímero. O EVA possui a característica de aumentar a viscosidade do material, logo é necessário uma maior quantidade de ligante modificado que o ligante convencional.

5.6.2 - Ensaio Duriez

No ensaio Duriez foram testados os três melhores teores do ensaio Marshall para cada concreto asfáltico. Para o concreto asfáltico convencional foram testados os teores de 4,5%, 4,75% e 5% e para o concreto asfáltico modificado foram testados os teores de 4,75%, 5% e 5,25%. A temperatura de usinagem, assim como no ensaio de dosagem Marshall, foi de 170°C (sendo 150°C a temperatura do ligante e a 170°C a temperatura dos agregados) e a temperatura de compactação foi de 150°C.

Os setenta e dois corpos de prova tiveram o peso e a altura média aferidos e estiveram dentro da tolerância de 1,0 g e 0,1 mm respectivamente.

Todos os teores testados tiveram resultados satisfatórios (relação r/R acima de 0,70) segundo os normativos franceses e foi mantida a confirmação inicial do teor ótimo de 4,75% para o concreto asfáltico convencional e de 5,0% para o concreto asfáltico modificado pelo EVA.

Notou-se que o concreto asfáltico modificado teve, na média, uma relação r/R maior que o concreto asfáltico convencional, ou seja, a modificação pelo polímero EVA fez com que o concreto asfáltico tivesse uma menor perda de resistência devido à ação da água.

5.6.3 - Ensaio de Deformação Permanente

No ensaio de Deformação Permanente, foram moldados oito placas de ensaio no total. Foram testados os teores de 4,5% e de 4,75% para o concreto asfáltico convencional e os teores de 4,75% e de 5,0% para o concreto asfáltico codificado pelo polímero EVA.

Em um primeiro momento os teores testados não foram satisfatórios, ultrapassando 15% de deformação em relação às dimensões iniciais. Mesmo assim, pôde-se concluir que o concreto asfáltico modificado resistiu a um número de ciclos maior que o concreto convencional para um mesmo afundamento.

Foi necessária a repetição do ensaio com a diminuição de 0,25% no teor ótimo para cada concreto asfáltico. Essa diminuição no teor de ligante para o ensaio de Deformação Permanente já era comprovado em alguns testes laboratoriais.

Nesse segundo momento, todas as placas passaram pelo teste, sendo que as placas de concreto asfáltico convencional afundaram 8% com 30.000 ciclos, não apresentando riscos de deformação permanente em condições ditas Severas. Já as placas modificadas com o polímero EVA, deformaram 2,0% da medida inicial com 30.000 ciclos, não apresentando riscos em condições ditas Muito Severas.

Assim como na primeira etapa, a segunda etapa de ensaio mostrou que o polímero EVA fez com que o concreto asfáltico modificado resistisse mais às solicitações de tráfego. Para o mesmo número de ciclos, o concreto asfáltico convencional teve uma maior deformação permanente.

Vale lembrar que as porcentagens que delimitam o ensaio de Deformação Permanente tem como base a frota circulante nas rodovias francesas, onde o eixo padrão de solicitação é de 130kN, maior que o normatizado para o Brasil que é de 80kN (8,2 tf). Logo, a metodologia

francesa é mais rigorosa e constitui condições mais severas que o Brasil (BARRA, 2009).

5.6.4 - Ensaio de Módulo Complexo

No ensaio de Módulo Complexo os valores encontrados para o dimensionamento foram de 9.721 MPa para o concreto asfáltico convencional e de 8.794 MPa para o concreto asfáltico modificado pelo EVA. Nas figuras seguintes encontram-se as sobreposições das curvas obtidas para o concreto asfáltico convencional e concreto asfáltico modificado pelo polímero EVA.

As sobreposições das curvas Isotérmicas do concreto asfáltico convencional e concreto asfáltico modificado encontram-se na Figura 80. Para as curvas de temperaturas de -10°C e 0°C todos os valores de Módulo do concreto convencional estão acima dos valores de Módulo do concreto modificado. Nas frequências menores de solicitação, os valores de Módulo do concreto convencional estiveram acima dos concretos modificados nas temperaturas mais baixas. Conforme há um aumento nas frequências, as posições das curvas invertem-se obtendo valores de Módulo do concreto modificado maiores que do concreto convencional.

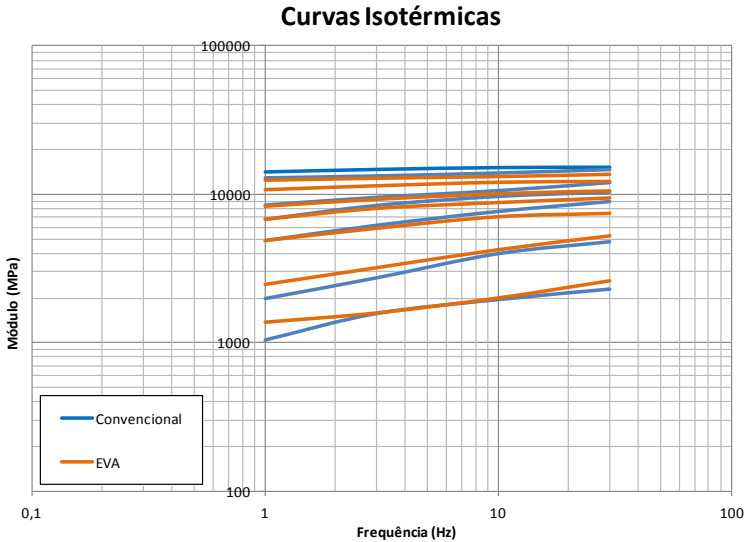


Figura 80 - Sobreposição das Isotérmicas.

As sobreposições das curvas de Equivalência Frequência-Temperatura do concreto asfáltico convencional e concreto asfáltico modificado encontram-se na Figura 81. As curvas mestras tiveram os valores de Módulo parecidas nas diferentes temperaturas de ensaio. A temperatura de 15°C foi a escolhida como referência (T_R). Nota-se que para temperaturas mais altas o valor de Módulo do concreto modificado é maior que do concreto convencional. Já nas temperaturas mais baixas os valores de Módulo do concreto modificado ficam menores que a dos concretos convencionais.

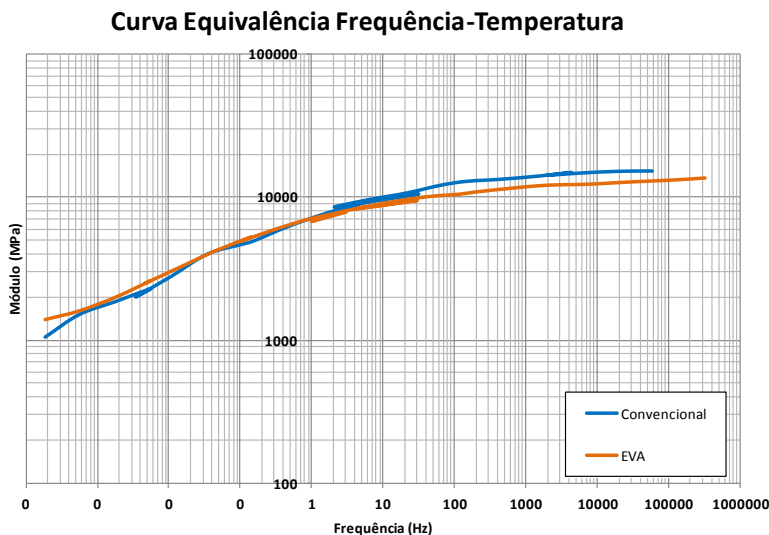


Figura 81 - Sobreposição das curvas Equivalência Frequência-Temperatura.

As sobreposições das curvas Isócronas do concreto asfáltico convencional e concreto asfáltico modificado encontram-se na Figura 82. Nota-se que nas temperaturas de -10°C e 0°C os valores de Módulo do concreto convencional estão acima dos valores do concreto modificado. Já nas temperaturas mais altas, a posições das curvas invertem-se deixando os valores de Módulo do concreto modificado maiores que do concreto convencional. Nas temperaturas de 10° e 20°C as curvas sobrepõem-se em quase todas as frequências de solicitação de carga.

Curvas Isócronas

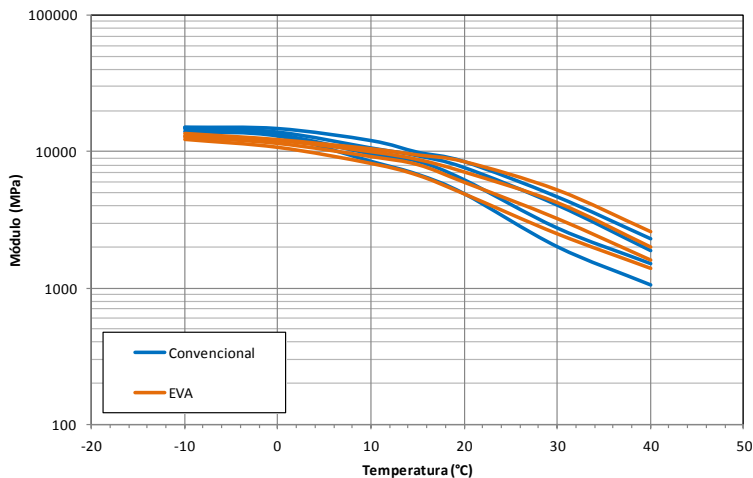


Figura 82 - Sobreposição das Isócronas.

As sobreposições das curvas do Espaço de Black do concreto asfáltico convencional e concreto asfáltico modificado encontram-se na Figura 83. Nesse gráfico nota-se que todos os valores de Módulo do concreto convencional estão acima dos valores do concreto modificado e o ângulo de fase também obteve os maiores resultados do concreto convencional para as mesmas temperaturas. A dispersão maior entre as duas curvas observa-se nas temperaturas mais altas, onde os valores do ângulo de fase também são maiores.

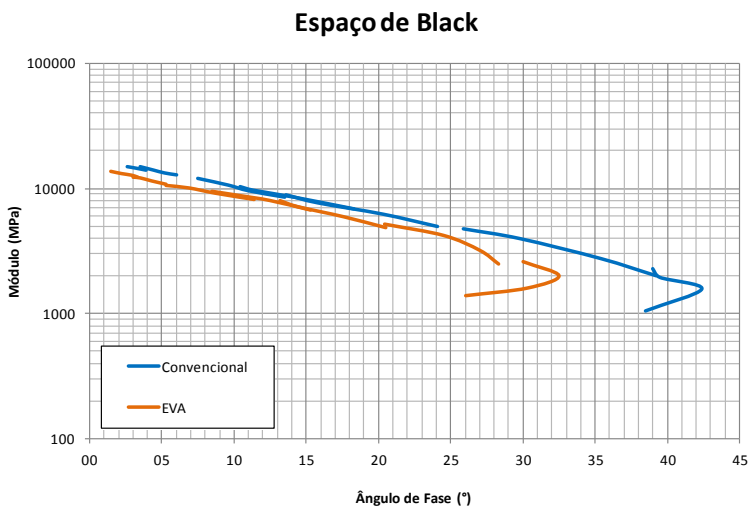


Figura 83 - Sobreposição das curvas do Espaço de Black.

As sobreposições das curvas do Plano Cole-Cole do concreto asfáltico convencional e concreto asfáltico modificado encontram-se na Figura 84. De todas as curvas do ensaio de Módulo Complexo, o Plano Cole-Cole obteve o maior afastamento entre os resultados. O concreto asfáltico convencional resultou em valores maiores da parte imaginária (viscosa) e da parte real (elástica) para todas as temperaturas analisadas. Nas temperaturas mais altas essa diferença é menor, tendo para as temperaturas mais altas uma dispersão maior.

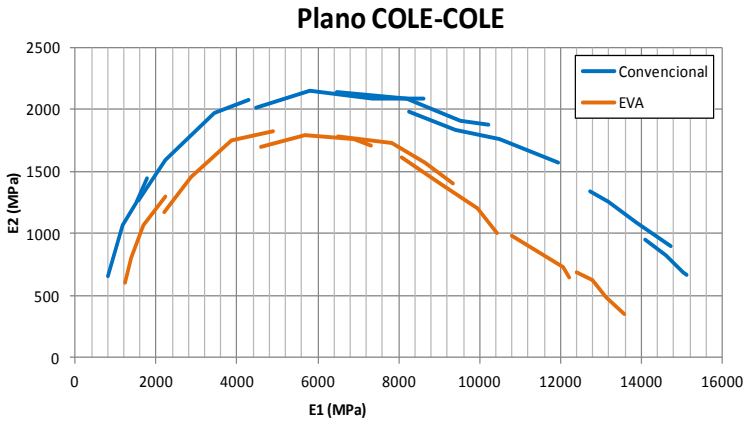


Figura 84 - Sobreposição dos Planos Cole-Cole.

Há uma redução do módulo imaginário praticamente para todas as temperaturas, especialmente para as temperaturas mais baixas.

Do concreto asfáltico convencional para o concreto asfáltico modificado houve uma redução da parte imaginária o que reflete no aumento da deformação ϵ_6 . Valores menores do módulo imaginário favorece a fadiga.

A temperatura crítica, aquela em que a parte imaginária é máxima, está entre 15°C e 20°C, tanto para o concreto asfáltico convencional e para o modificado. Diferentemente da temperatura do ensaio de Fadiga citada pela norma francesa de 10°C.

Os valores de módulo real e imaginário para a temperatura utilizada no ensaio de fadiga de 10°C e frequência de 25 Hz encontram-se na Tabela 27, obtidos por interpolação.

Tabela 27 - Valores de módulo a 10°C e 25 Hz por interpolação.

	TEMPER. (°C)	FREQ. (Hz)	E* (MPa)	E1 (MPa)	E2 (MPa)	PHI (°)
CONV.	10	30	12050	11947	1573	7,5
	10	25	11697	11582	1620	8,0
	10	10	10636	10487	1761	9,6
EVA	10	30	10486	10437	1005	5,5
	10	25	10373	10318	1055	5,9
	10	10	10033	9960	1205	6,9

Os valores de módulo real e imaginário do concreto asfáltico modificado diminuem em relação ao concreto asfáltico convencional na temperatura crítica de 10°C e frequência de 25Hz.

No geral, para as temperaturas mais baixas, o concreto asfáltico convencional resultou em valores maiores da parte imaginária (viscosa) e da parte real (elástica). Já para as temperaturas altas, o concreto asfáltico resultou em valores maiores da parte imaginária e menores na parte real.

5.6.5 - Ensaio de Fadiga

A análise dos resultados do ensaio de Fadiga é realizada através de valores retirados das curvas de Fadiga que contém a representação das hipérboles da zona de confiança, a equação da curva de Fadiga, a indicação da deformação épsilon 6 (ϵ_6), a variação do épsilon 6 ($\Delta\epsilon_6$), o desvio padrão dos resíduos e as características do concreto asfáltico.

O valor de $\Delta\epsilon_6$ é a variação de ϵ_6 no intervalo de confiança representado sobre as curvas limites da hipérbole. Os valores de $\Delta\epsilon_6$ faz com que a zona da hipérbole de confiança tenham limites maiores ou menores. No concreto asfáltico convencional o valor de $\Delta\epsilon_6$ é de $9,8 \cdot 10^{-6}$ e para o concreto asfáltico modificado pelo polímero EVA é de $20,20 \cdot 10^{-6}$, ou seja, os resultados do concreto asfáltico modificado são mais dispersos.

O desvio padrão (SN) do concreto asfáltico convencional é 0,2547 e do concreto asfáltico modificado pelo EVA é 0,3085, ou seja, os valores do concreto asfáltico convencional estão mais homogêneos.

O valor de R^2 é o coeficiente de correlação entre os valores do ensaio de Fadiga. No concreto asfáltico convencional o valor de R^2 é de 0,6333 e para o concreto asfáltico modificado o valor de R^2 é de 0,4762. Isto quer dizer que os valores de ensaio do concreto modificado estão mais dispersos, não homogêneos, em relação aos dados de concreto convencional.

Dos dados retirados da curva de Fadiga, o mais importante é a deformação para um milhão (10^6) de ciclos, pois é utilizada no dimensionamento do pavimento. O concreto asfáltico modificado pelo polímero EVA obteve um resultado melhor que o concreto asfáltico convencional, ou seja, para o pavimento se romper a um milhão (10^6) de ciclos, o concreto convencional resistiria a uma deformação de 161,51 μdef e o concreto asfáltico modificado resistiria a uma deformação maior de 178,90 μdef .

Assim, como nos resultados das pesquisas de BRINGEL *et al* (2005) e ILDEFONSO (2007) o concreto asfáltico modificado pelo polímero EVA possui uma maior resistência à fadiga do que os concretos convencionais. Esses autores utilizaram ensaios que analisavam a termogravimetria e o envelhecimento para afirmar a eficiência do polímero.

O ensaio fundamental de Fadiga realizado na presente pesquisa é o que mais se aproxima das solicitações que ocorrem em campo podendo, assim, afirmar que a modificação do concreto asfáltico pelo polímero é realmente eficaz.

Vale salientar que o ensaio de Fadiga realizado em modo contínuo nessa pesquisa está a favor da segurança, uma vez que no campo o fenômeno acontece em intervalos que favorecem a dissipação de energia, diminui o aquecimento por atrito interno e ocorre a autorreparação do concreto asfáltico. Ou seja, quanto maior o período de repouso maior é a duração de vida do material.

O intuito de utilizar ligantes modificados é para que melhorem as características do concreto asfáltico, mas nem todos os resultados foram satisfatórios para o concreto modificado como foi visto nos gráficos do ensaio de Módulo Complexo. Apesar do valor de módulo para o dimensionamento do concreto modificado ser menor (15°C e 10Hz), ainda assim, a deformação para um milhão de ciclos é maior. Com a diminuição da parte viscosa há uma diminuição da perda de energia do material.

Portanto, para um estudo do comportamento do concreto asfáltico é necessária uma simulação de dimensionamento do pavimento para analisar os dados do ensaio de Fadiga e do Módulo Complexo simultaneamente.

CAPÍTULO 6

6 - DIMENSIONAMENTO SIMULADO DE UMA ESTRUTURA DE PAVIMENTO

Para que os concretos asfálticos tenham um bom desempenho no pavimento durante toda a vida útil, é necessário que a avaliação através de ensaios fundamentais para serem aplicados ao dimensionamento de pavimentos. Dimensionando de maneira que as deformações calculadas sejam inferiores às deformações admissíveis.

Para o cálculo das deformações foi utilizada a ferramenta *ViscoRoute*. O *ViscoRoute* abrange a viscoelasticidade dos materiais asfálticos utilizando o modelo de *Huet-Sayegh*. É utilizado um modelo reológico de comportamento dos concretos asfálticos e a série de *Fourier* para cálculo analítico. Leva-se de uma referência fixa a uma referência em movimento que abrange a velocidade, sendo solucionado pela dupla transformada de *Fourier* nas direções longitudinal e transversal, calculando as deformações e as tensões nas diferentes posições da estrutura de acordo com a intensidade de carga, temperatura e velocidade do veículo (DUHAMEL *et al*, 2005).

O dimensionamento determina as espessuras das camadas considerando as características mecânicas dos materiais combinadas com dados experimentais.

Os concretos asfálticos considerados resistentes devem ter comportamento não quebradiço que suportem as deformações de distensão (tração) e de contração (compressão) ao mesmo tempo oriundas dos esforços de flexão alternada provenientes das cargas solicitantes aplicadas sobre as estruturas dos pavimentos que as conduzem ao colapso por fadiga.

Para o dimensionamento, foram utilizados os valores obtidos no ensaio de Fadiga e Módulo Complexo. A deformação admissível e a rigidez dos materiais sob cargas solicitantes são uma das variáveis mais importantes para o correto dimensionamento de um pavimento.

A Tabela 28 apresenta os resultados dos ensaios de Fadiga e Módulo Complexo dos concretos asfálticos convencionais e modificados pelo polímero EVA necessários para dimensionar o pavimento.

Tabela 28 - Resultados dos ensaios de Fadiga e Módulo Complexo.

CONCRETO ASFÁLTICO	FADIGA		MÓDULO COMPLEXO	
	$\epsilon_6 (10^6)$ 10°C, 25Hz	1/b	E* 10°C, 10Hz	E 15°C, 10Hz
Convenc.	161,5	-0,225	10636	9721
EVA	171,9	-0,256	10033	8794

Existem duas deformações admissíveis, sendo uma no topo das camadas subjacentes à superfície (z) e outra na base da camada asfáltica. A primeira está relacionada aos materiais componentes das camadas de base, sub-base e subleito. A segunda possui relação com o limite de deformação de acordo com os parâmetros observados no ensaio de Fadiga (OTTO, 2009).

O dimensionamento limita-se à comparação dessas duas deformações que são calculadas através das variáveis:

- ♦ coeficiente de agressividade;
- ♦ média diária anual;
- ♦ taxa de crescimento anual;
- ♦ período de projeto inicial;
- ♦ classe dos veículos;
- ♦ eixo-padrão;
- ♦ período de projeto inicial;
- ♦ tráfego acumulado por faixa;
- ♦ coeficiente de risco.

Na Tabela 29 encontram-se os parâmetros de tráfego utilizados para dimensionar o pavimento simulado dessa dissertação.

Tabela 29 - Parâmetros de dimensionamento.

PARÂMETROS	VALORES
Classe	T1+ (VMDA \geq 500 caminhões)
Eixo-padrão (kN)	130,0
Taxa de crescimento anual (%)	3,5
Período de projeto inicial (anos)	15,0
Coefficiente agressividade (CAM)	1,0
Coefficiente de risco (%)	10,0
Tráfego acumulado por faixa (N)	$4,90 \times 10^6$

Para o dimensionamento foi considerado um tráfego médio definido como Classe T1+ de acordo com a Tabela 30.

Tabela 30 - Classes de tráfego (SETRA-LCPC, 1997).

Classe	T5	T4	T3		T2	
			-	+	-	+
VMDA mínimo	0	25	50	85	150	200
VMDA máximo	25	50	85	150	200	300

Classe	T1		T0		TS		TEX
	-	+	-	+	-	+	
VMDA mínimo	300	500	750	1200	2000	3000	> 5000
VMDA máximo	500	750	1200	2000	3000	5000	

O eixo-padrão considerado é de 130kN definido pelo manual *Service d'Études Techniques des Routes et Autoroutes* (SETRA-LCPC, 1997).

Para obter a taxa de crescimento anual, geralmente é realizado com estudo de tráfego, e para esse projeto foi considerado uma taxa de crescimento de 3,5%.

O projeto inicial considerado é de 15 anos para um tráfego médio. O coeficiente de agressividade (CAM) é igual a 1 para Classe de tráfego T1+.

O número de eixos equivalentes (NE) e o tráfego acumulado por faixa (N) são calculados utilizando-se as equações (6.1), (6.2) e (6.3).

$$NE = N \cdot CAM \quad (6.1)$$

$$N = 365 \cdot ADM \cdot C \quad (6.2)$$

$$C = \frac{(1 + \tau)^p - 1}{\tau} \quad (6.3)$$

Onde:

NE	=	número de eixos equivalentes;
N	=	tráfego acumulado por faixa;
CAM	=	coeficiente de agressividade;
ADM	=	media diária anual;
C	=	acumulação do fator para o período de cálculo;
τ	=	taxa de crescimento anual (%) e
p	=	período de projeto inicial (anos).

Pela metodologia de dimensionamento SETRA-LCPC (1997) a deformação admissível no topo das camadas subjacentes à superfície (base, sub-base e subleito) para tráfego médio é definida pela Equação (6.4).

$$\varepsilon_{z,adm} = 0,012 \cdot (NE)^{-0,222} \quad (6.4)$$

Onde:

$\varepsilon_{z,adm}$	=	deformação admissível no topo do subleito (direção z) e
NE	=	número de eixos equivalentes.

Já a deformação admissível na base das camadas asfálticas é calculada pela Equação (6.5).

$$\varepsilon_{(NE, \theta_{eq}, f)} = \varepsilon_{6(10^{\circ}C, 25Hz)} \cdot \left(\frac{E_{(10^{\circ}C)}}{E_{(\theta_{eq})}} \right)^{0,5} \cdot \left(\frac{NE}{10^6} \right)^b \quad (6.5)$$

Onde:

$\varepsilon_{NE, \theta_{eq}, f}$	=	deformação admissível do material em função do número de eixos equivalentes da temperatura equivalente e da frequência de solicitação;
ε_6	=	deformação calculada a partir do ensaio de fadiga a 10°C e 25 Hz;
$E(10^{\circ}C)$	=	módulo complexo a 10°C;
$E(\theta_{eq})$	=	módulo complexo à temperatura equivalente de estudo (15°C, 10Hz);
NE	=	número de eixos equivalente e
b	=	inclinação da reta de fadiga.

Os coeficientes de correção Kr, Kc e Ks são aplicados aos valores de deformações admissíveis das camadas betuminosas.

O coeficiente de risco (r) adotado foi de 20%. O coeficiente Kr ajusta a deformação admissível em consideração ao risco (r). As Equações (6.6) e (6.7) (SETRA-LCPC, 1997) mostram o cálculo de Kr e δ respectivamente.

$$Kr = 10^{-ub\delta} \quad (6.6)$$

$$\delta = (SN^2 + \left(\frac{c^2}{b^2}\right) \cdot SH^2)^{0,5} \quad (6.7)$$

Onde:

u	=	variável associada ao risco (r) u = -0,84 para valor de risco de 20%;
b	=	inclinação da reta de fadiga do material;
δ	=	desvio-padrão da distribuição;
SN	=	desvio-padrão dos resíduos;
c	=	0,02 para estruturas habituais e
SH	=	dispersão sobre a espessura da camada.

O valor de 1,1 para o coeficiente K_c correspondente aos concretos asfálticos. Ele ajusta os resultados do modelo computacional de acordo com o comportamento observado sobre estruturas de pavimentos reais do mesmo tipo.

O coeficiente K_s refere-se a falta de uniformidade de suporte do subleito, mas nessa pesquisa adotou-se valor 1.

A Tabela 31 apresenta os valores dos coeficientes de ajustes K_r , K_c e K_s e as deformações admissíveis das camadas do pavimento ($\epsilon_{z,adm}$) e do concreto asfáltico (ϵ_{adm}). Os valores de $\epsilon_{z,adm}$ foram obtidas através da Equação (6.4) e os valores de ϵ_{adm} foram obtidas pela Equação (6.5) multiplicados pelos coeficientes K_r , K_c e K_s .

Tabela 31 - Valores dos coeficientes e as deformações admissíveis.

CONCRETO ASFÁLTICO	NE	K_r	K_c	K_s	ϵ (z,adm)	ϵ (adm)
Convencional	4,90E+06	0,90	1,1	1,0	392,5	117,0
EVA	4,90E+06	0,90	1,1	1,0	392,5	125,9

A Classe do subleito escolhido para esse dimensionamento é a PF2, de acordo com a Tabela 32, visto que o módulo do subleito é de 60MPa. Logo, os valores para o dimensionamento das camadas subjacentes são de 540MPa para a base de brita graduada simples e 180MPa para a sub-base. Definido o valor de módulo para o subleito, este é multiplicado por três para a sub-base e novamente por três para obter o valor de módulo da base de brita graduada.

Tabela 32 - Classe de capacidade da plataforma (sub-leito).

CLASSE	PF1	PF2	PF3	PF4
Módulo mínimo (MPa)	20	50	120	> 200
Módulo máximo (MPa)	50	120	200	

O coeficiente de *Poisson* considerado para o cálculo do dimensionamento é de 0,35 segundo a SETRA-LCPC (1997).

Os parâmetros do modelo de Huet-Sayegh, Tabela 33, foram determinados com o programa Viscoanálise, desenvolvido pelo LCPC.

Tabela 33 - Parâmetros Huet-Sayegh.

CONCRETO	E_{inf}	E_0	k	h	δ	τ
Convenc.	18314,2	115,24	0,165	0,546	1,141	0,1476
EVA	15588,5	310,95	0,145	0,499	0,827	0,1986

Após dimensionar o pavimento simulado encontra-se os valores finais das camadas de concreto asfáltico convencional, base (brita graduada simples - BGS) e sub-base, como mostra a Tabela 34.

Tabela 34 - Espessuras dos pavimentos do concreto convencional.

CAMADA PAVIMENTO	Espessura (cm)	$\varepsilon(z,calc)$ (10^{-6})	$\varepsilon(z,adm)$ (10^{-6})	$\varepsilon(calc)$ (10^{-6})	$\varepsilon(adm)$ (10^{-6})
Convencional	10	-	-	114,5	117,0
BGS	35,0	-	-	-	-
Sub-base	30,0	-	-	-	-
Subleito	-	297,9	392,5	-	-

É dimensionado também os valores finais das camadas de concreto asfáltico modificado pelo polímero EVA, base (brita graduada simples - BGS) e sub-base, como mostra a Tabela 35.

Tabela 35 - Espessuras dos pavimentos do concreto modificado pelo polímero EVA.

CAMADA PAVIMENTO	Espessura (cm)	$\epsilon(z,calc)$ (10^{-6})	$\epsilon(z,adm)$ (10^{-6})	$\epsilon(calc)$ (10^{-6})	$\epsilon(adm)$ (10^{-6})
EVA	8,0	-	-	125,4	125,9
BGS m	35,0	-	-	-	-
Sub-base	30,0	-	-	-	-
Subleito	-	268,1	392,5	-	-

As camadas dimensionadas para o concreto asfáltico convencional encontram-se na Figura 85.



Figura 85 - Estrutura do pavimento de concreto asfáltico convencional.

As camadas dimensionadas para o concreto asfáltico modificado pelo polímero EVA encontram-se na Figura 86.



Figura 86 - Estrutura do pavimento de concreto asfáltico modificado pelo polímero EVA.

Os valores de deformação admissíveis retiradas a partir do ensaio de Fadiga devem ser maiores que as deformações calculadas e geradas pelo *software* ViscoRoute, como mostra a relação:

$$\epsilon_{\text{calculada}} < \epsilon_{\text{admissível}}$$

As deformações admissíveis nas camadas subjacentes é de $392,5 \cdot 10^{-6}$, calculadas pela Equação (6.4), tanto para o concreto asfáltico convencional como para o concreto asfáltico modificado pelo EVA, pois só depende do número de eixos equivalentes. Já as deformações admissíveis nas camadas asfálticas é de $117,0 \cdot 10^{-6}$ para o concreto asfáltico convencional e de $125,9 \cdot 10^{-6}$ para o concreto asfáltico modificado pelo EVA. Esses valores devem ser maiores do que as deformações calculadas pelo programa computacional para o dimensionamento.

As deformações calculadas nas camadas subjacentes é de $297,9 \cdot 10^{-6}$ para o concreto asfáltico convencional e de $268,1 \cdot 10^{-6}$ para o concreto asfáltico modificado pelo EVA. Já as deformações calculadas nas camadas asfálticas é de $114,5 \cdot 10^{-6}$ para o concreto asfáltico convencional e de $125,4 \cdot 10^{-6}$ para o concreto asfáltico modificado pelo EVA. Na Tabela 36 encontram-se as relações dos quatro tipos de deformações.

Tabela 36 - Deformações calculadas e admissíveis.

	DEFORMAÇÃO CAMADA SUBJACENTE	DEFORMAÇÃO CAMADA ASFÁLTICA
	$\epsilon_{\text{calculada}} < \epsilon_{\text{admissível}}$	$\epsilon_{\text{calculada}} < \epsilon_{\text{admissível}}$
Convenc.	297,9 < 392,5	114,5 < 117,0
EVA	268,1 < 392,5	125,4 < 125,9

Portanto, pode-se concluir que todos os valores de deformação calculados, tanto para as camadas subjacentes quanto para as camadas de concreto asfáltico, são inferiores aos limites estabelecidos pelas deformações admissíveis validando, assim, o dimensionamento simulado.

CAPÍTULO 7

7 - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Neste capítulo são apresentadas as conclusões da dissertação após a análise dos resultados. São propostas algumas recomendações para uso dos dados dos ensaios realizados e são feitas, também, sugestões para estudos futuros na previsão de problemas que fazem diminuir o tempo de vida do pavimento.

7.1 - CONCLUSÕES

O objetivo geral deste trabalho em estudar o comportamento dos concretos asfálticos modificados pelo polímero EVA no domínio viscoelástico foi alcançado através dos ensaios de Módulo Complexo e da Fadiga. O concreto asfáltico convencional foi comparado ao concreto asfáltico modificado em relação às propriedades mecânicas de rigidez e à deformação admissível.

Os ensaios fundamentais executados para essa dissertação mostram que é possível realizar estudos que avaliem o comportamento mecânico dos concretos asfálticos necessários para dimensionar um pavimento durável. Os pavimentos comportam-se de maneiras diferentes com as diversas temperaturas e frequências de solicitação, sendo necessária a inclusão do efeito da viscoelasticidade para uma maior precisão quanto à durabilidade do pavimento.

A partir de ensaios preliminares realizados foi possível gerar dados para o estudo da deformação admissível e das propriedades mecânicas de rigidez. Inicialmente a caracterização do ligante foi realizada a partir de ensaios de Recuperação Elástica, Ponto de Amolecimento, Penetração e Viscosidade Brookfield. A grande maioria dos resultados estava dentro dos limites preconizados pelas normas correspondentes.

Em seguida, foi dada a partida para os ensaios empíricos da metodologia francesa. O único ensaio que não pôde ser realizado foi o ensaio da PCG, que foi substituído pelo ensaio de dosagem Marshall. Nesse ensaio chegou-se a conclusão de que o teor ótimo para o concreto

asfáltico convencional é de 4,75% e para o concreto asfáltico modificado pelo EVA o teor ótimo é de 5,0%.

No ensaio Duriez todos os teores testados tiveram resultados satisfatórios (relação r/R acima de 0,70) segundo os normativos franceses e foi mantida a confirmação inicial do teor ótimo de 4,75% para o concreto asfáltico convencional e de 5,0% para o concreto asfáltico modificado pelo EVA.

Já no ensaio de Deformação Permanente, foi necessária a repetição do ensaio, pois os corpos de prova ultrapassaram os limites definidos pela norma. Novas placas foram formuladas, com a diminuição em 0,25% do teor de ligante. Nesse segundo momento, todas as placas passaram pelo teste, sendo que as placas de concreto asfáltico convencional afundaram 8% com 30.000 ciclos. Já as placas modificadas com o polímero EVA, deformaram 2% da medida inicial com 30.000 ciclos, não apresentando riscos de deformação permanente.

Com a finalização dos ensaios empíricos, foi possível iniciar os ensaios fundamentais. No ensaio de Módulo Complexo os valores encontrados para o dimensionamento foram de 9.721MPa para o concreto asfáltico convencional e de 8.794MPa para o concreto asfáltico modificado pelo EVA. Através desse ensaio foi possível gerar gráficos de curvas Isotérmicas, curvas de Equivalência Frequência-Temperatura, curvas Isócronas, curvas do Espaço de Black e curvas do Plano Cole-Cole. Com o estudo dessas curvas faz-se um melhor entendimento sobre o comportamento dos concretos asfálticos podendo entender a importância das diferentes temperaturas e frequências de solicitação em campo.

Do ensaio de Fadiga foram retirados a deformação admissível de 161,51 μdef para o concreto asfáltico convencional e 178,90 μdef para o concreto asfáltico modificado. Este último teve uma maior resistência à fadiga para um milhão (10^6) de ciclos. A fadiga não ocorreu na temperatura crítica tanto no concreto convencional como no concreto modificado passando de 10°C para temperaturas críticas entre 15°C e 20°C.

A eficácia do polímero EVA quando modifica o concreto asfáltico convencional foi constatado no ensaio de Duriez que teve uma menor perda de resistência devido à ação da água, no ensaio de Deformação Permanente onde teve uma maior resistência às solicitações de tráfego para o mesmo número de ciclos, no ensaio de Fadiga que obteve um resultado melhor que o concreto asfáltico convencional onde para um milhão (10^6) de ciclos, resistiu a uma deformação maior.

Os dados dos ensaios de Módulo Complexo e da Fadiga no domínio viscoelástico foram utilizados no dimensionamento simulado. O dimensionamento simulado demonstrou que o uso do ligante asfáltico modificado pelo polímero EVA fez com que diminuísse em 2 cm a camada asfáltica (20% a menos da espessura do concreto asfáltico convencional). Em se tratando de obras de pavimentação que se estendem por quilômetros, essa pequena espessura faz com que reduza os custos de uma obra rodoviária e aumente a vida útil do pavimento, visto que o concreto asfáltico modificado resiste mais à deformação permanente e à fadiga do que os concretos asfálticos convencionais.

7.2 - RECOMENDAÇÕES

A continuidade dos estudos poderia ocupar-se empregando outros tipos de ligantes asfálticos, como o CAP 10/20 e CAP 30/45, ou também testar diferentes teores de polímero EVA e composições de polímeros com aditivos. Essas variáveis são recomendadas para um estudo mais profundo sobre a modificação de concretos asfálticos.

REFERÊNCIAS

ABIPLAST – Associação Brasileira da Indústria do Plástico. **O perfil da indústria brasileira de transformação de material plástico - Perfil 2009**. São Paulo, 2010.

ALENCAR, A. E. V. *et al.* **Estudo da estabilidade a estocagem de ligante asfáltico modificado com resíduo de copolímero EVA descartado pela indústria calçadista**. 32^a Reunião Anual da Sociedade Brasileira de Química. Fortaleza, 2009.

ALLEN, N. S. *et al.* **Aspects of the thermal oxidation of ethylene vinyl acetate copolymer**. The Manchester Metropolitan University, Madri. Polymer degradation and stability, v. 68, n. 3, p. 363-371, 2000.

AMINOCAP. **Reticular ADICAP-RE**. Folha de dados - Normas de uso. São Paulo, 2010.

BAAJ, H. **Comportement a la fatigue des matériaux granulaires traités aux liants hydrocarbonés**. 2002. 243 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) L'Institut National des Sciences Appliquees de Lyon, Lyon, 2002.

BARRA, B. S. **Avaliação da ação da água no módulo complexo e na fadiga de misturas asfálticas densas**. 2009. 327 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina, 2009.

BERNUCCI, L. B. *et al.* **Pavimentação asfáltica: Formação básica para engenheiros**. Rio de Janeiro: ABEDA, 2007.

BRASKEM. **Copolímero de Etileno-Acetato de Vinila HM728**. Folha de dados, revisão 4, 2010.

BRINGEL, R. M. **Estudo químico e reológico de ligantes asfálticos modificados por polímeros e aditivos**. 2007. 174 f. Dissertação (Mestrado em Química Inorgânica) - Centro de ciências do departamento de química orgânica e inorgânica, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2007.

BRINGEL, R. M.; SOARES, S. A.; SOARES, J. B. **Propriedades químicas e reológicas de asfalto modificado por copolímero EVA**. III Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás, Salvador, 2005.

BRULÉ, B.; BOURLLOT, F. **Choix d'un bitume pour liant modifié EVA revue générale des routes et des aerodromes dossier**. Bitumes modifié, v. 711, p. 46-48, 1993.

CAMPOS, O. S. **Análise do comportamento de trecho piloto de revestimento poroso com asfalto modificado por polímero**. 1998. 178 f. Tese (Doutorado em Engenharia). Universidade de São Paulo, São Paulo, 1998.

DUMKE, M. P. **Concreto asfáltico drenante com fibras de celulose, ligante modificado por polímero e asfalto-borracha**. 2005. 111 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina, 2005.

CASTAÑEDA, E. **Contribution de methodes non destructives a l'évaluation de l'effet de l'eau sur les enrobés bitumineux**. 2004. Thèse de doctorat (Tese em Engenharia Civil). Université de Nantes, Nantes, 2004.

CUNHA, T. M. F.; D'ANTONA, D. M.; FROTA, C. A. **Estudo do ligante CAP 50/70 modificado pelo polímero EVA para vias urbanas de Manaus/AM**. Petro & Química, v. 322, p. 47-51, 2010.

D'ANTONA, D. M. G. **Estudo de misturas asfálticas com ligante modificado por polímero EVA e resíduo da construção civil para as vias urbanas de Manaus**. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2009.

DE LA ROCHE, C. **Module de rigidité et comportement em fatigue des enrobés bitumineux**. 1996. 185 f. Thèse de docteur (Tese em Engenharia Civil). École Central de Paris, Paris, 1996.

DE MOURA, E. **Estudo do efeito de aditivos químicos e da cal como melhoradores de adesividade em misturas asfálticas densas**. 2001. 122 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.

DNER. **Pesquisa de asfaltos modificados por polímeros**. Relatório final - Ministério dos transportes. Diretoria de desenvolvimento tecnológico. Tomo I, II e III. Rio de Janeiro, 1998.

DNER-ME 035. **Agregados - Determinação da abrasão *Los Angeles***. Norma rodoviária - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1998.

DNER-ME 043. **Misturas betuminosas a quente: Ensaio Marshall**. Norma rodoviária - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1995.

DNER-ME 078. **Agregado graúdo - Adesividade a ligante betuminoso**. Norma rodoviária - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1994.

DNER-ME 081. **Agregados - Determinação da absorção e da densidade de agregado graúdo**. Norma rodoviária - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1998.

DNER-ME 078. **Agregado graúdo - Adesividade a ligante betuminoso**. Norma rodoviária - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1994.

DNER-ME 089. **Agregados - Avaliação da durabilidade pelo emprego de soluções de sulfato de sódio ou de magnésio**. Norma rodoviária - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1994.

DNIT 031-ES. **Pavimentos flexíveis – Concreto asfáltico**. Especificação de serviço. Rio de Janeiro, 2006.

DNIT 095-EM. **Cimentos asfálticos de petróleo**. Especificação de material. Rio de Janeiro, 2006.

DNIT 129-EM. **Cimento asfáltico de petróleo modificado por polímero elastomérico**. Especificação de material. Rio de Janeiro, 2011.

DNIT 130-ME. **Determinação da recuperação elástica de materiais asfálticos pelo ductilômetro**. Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2010.

DNIT 131-ME. **Materiais asfálticos - Determinação do ponto de amolecimento - Método do anel e bola.** Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2010.

DNIT 155-ME. **Material asfáltico - Determinação da penetração.** Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2010.

DNIT. **SNV - Sistema Nacional de Viação, Versão 2011.** DPP/CGPLAN/Coordenação de Planejamento, 2012.

DOMEC, V. **Endommagement par fatigue des enrobés bitumineux em condition de trafic simule et de température.** 2005. Tese (Doutorado). Université de Bordeaux I, Bordeaux, 2005.

DUHAMEL, D. *et al.* **Viscoroute: Modélisation des chaussées bitumineux bulletin de liaison des ponts et chaussées.** École nationale des ponts et chaussées, LCPC. Bulletin, 2005.

FARJALLAT, J. E. S. **Desagregabilidade de rochas e problemas relativos a sua aplicabilidade.** 4^a Semana paulista de geologia aplicada. Associação Paulista de Geologia Aplicada - APGA. São Paulo, p. 19-35, 1972.

FREITAS, F. J. S. **Asfalto modificado com EVA.** Anais da 30^a reunião anual de pavimentação, v.1, p. 61-74, 1996.

FROTA, C. A.; D'ANTONA, D. M. G. **Estudo de misturas asfálticas com ligante modificado pelo polímero EVA para pavimentos urbanos de Manaus - AM.** Polímeros, São Carlos, ISSN 0104-1428, 2011.

FÜLLER, W. B.; THOMPSON, S. E. **The law of proportioning concrete.** Transport American Society of Civil Engineers. Vol. 23, n° 9, march, 1907.

GRECA, M. R.; MORILHA, A. **Betume Borracha Ecoflex.** Curitiba, 2003.

ILDEFONSO, J. S. **Análise da viabilidade técnica da utilização do copolímero de etileno e acetato de vinila (EVA) descartado pela indústria calçadista em misturas asfálticas (processo seco)**. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

IBP – Instituto Brasileiro de Petróleo, Gás e Biocombustíveis. **Informações básicas sobre materiais asfálticos**. Comissão de asfalto, Rio de Janeiro, 1999.

LCP. **Manuel LPC d'aide à la formulation des enrobés**. Groupe de travail RST "Formulation des enrobés". Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Paris, 2007.

LEITE, L. F. M. **Estudos de preparo e caracterização de asfaltos modificados por polímero**. 1999. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia de Polímeros). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1999.

MAILLARD, S. **Fissuration et autoréparation des liants bitumineux – Apport de l'essai de rupture locale répétée sur bitume**. 2005. Thèse (Doutorado em Engenharia Civil) Université de Nantes, Nantes, 2005.

MOMM, L. **Estudo dos efeitos da granulometria sobre a macrotextura superficial do concreto asfáltico e seu comportamento mecânico**. 1998. 259 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1998.

MORILHA, A. **Estudo sobre a ação de modificadores no envelhecimento dos ligantes asfálticos e nas propriedades mecânicas e de fadiga dos concretos asfálticos**. 2004. 165 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004.

MOTHÉ, M. G. **Estudo do comportamento de ligantes asfálticos por reologia e análise térmica**. 2009. 204 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

MOTTA, L. M. G. **Método de dimensionamento de pavimentos flexíveis; critérios de confiabilidade e ensaios de cargas repetidas.** 1991. 366 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1991.

NBR 12891. **Dosagem de misturas betuminosas pelo método Marshall.** Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. Rio de Janeiro, 1993.

NBR 14329. **Cimento asfáltico de petróleo - Determinação expedita da resistência à água (adesividade) sobre agregados graúdos.** Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT. Rio de Janeiro, 1999.

NBR 15184. **Materiais betuminosos – Determinação da viscosidade em temperaturas elevadas usando um viscosímetro rotacional.** Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT. Rio de Janeiro, 2004.

NBR 17094-2. **Máquinas elétricas girantes - Motores de indução. Parte 2: Monofásicos.** Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT. Rio de Janeiro, 2008, 57 p.

NEGRÃO, D. P. **Estudo de asfaltos modificados por polímeros do tipo RET para aplicações em pavimentos.** 2006. 179 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

NF 12697-24+A1. **Mélanges bitumineux: méthodes d'essai pour mélange hydrocarboné à chaud. Résistance à la fatigue.** Association Française de Normalisation - AFNOR. Partie 24, 2007.

NF 12697-26. **Mélanges bitumineux: méthodes d'essai pour mélange hydrocarboné à chaud. Module de rigidité.** Association Française de Normalisation - AFNOR. Partie 26, 2004.

NF 98-130 a 141. **Essais relatifs aux chaussées: préparation des mélanges hydrocarbonés. Etude de la conformité d'un enrobé.** Association Française de Normalisation - AFNOR. 1993.

NF 98-250-2. Essais relatifs aux chaussées: préparation des mélanges hydrocarbonés. **Compactage des plaques**. Association Française de Normalisation - AFNOR. Partie 2, 1991.

NF 98-250-3. Essais relatifs aux chaussées: préparation des mélanges hydrocarbonés. **Confection d'éprouvettes dans um bloc de melange hydrocarboné**. Association Française de Normalisation - AFNOR. Partie 3, 1993.

NF 98-251-1. Essais relatifs aux chaussées: préparation des mélanges hydrocarbonés. **Essai Duriez**. Association Française de Normalisation - AFNOR. 1995.

NF 98-252. Essais relatifs aux chaussées: essai de compactage à la presse à cisaillement giratoire. **PCG**. Association Française de Normalisation - AFNOR. 1999.

NF 98-253-1. Préparation des mélanges hydrocarbonés. **Essai d'Orniérage**. Association Française de Normalisation - AFNOR. Partie 1, 1993.

NF 98-261-1. Essais relatifs aux chaussées: Détermination de La résistance em fatigue des mélanges hydrocarbonés. **Essai par flexion à fleche constance**. Association Française de Normalisation - AFNOR. Partie 1, 1993.

OTTO, G. G. **Misturas asfálticas mornas: verificação da fadiga e do módulo complexo**. 2009. 180 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina, 2009.

QUINTERO, C. F. Q. **Estudo de misturas asfálticas com ligantes de consistência elevada - Formulação e comportamento mecânico**. 2011. 203 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina, 2011.

RIVIÈRE, N. **Comportement em fatigue des enrobés betumineux**. 1996. Tese (Doutorado) Université de Bordeaux I, Bordeaux, 1996.

RODRIGUES, F. O. *et al.* **Investigação das propriedades reológicas de ligante asfáltico modificado por SBS e EVA com adição de LCC.** ABPv, Fortaleza, 2009.

ROHDE, L. **Estudo de misturas asfálticas de módulo elevado para camadas estruturais de pavimentos.** 2007. Tese (Doutorado) Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

SAÏD, S. F. **Fatigue characteristics of asphalt concrete mixtures.** Research Report n° 41300503-8. Väg-och Trafikinstitutet. Sweden, 1988.

SANTOS, A. O. J.; MARTINS, R. F. B. **Avaliação de ligantes asfálticos modificados por resíduos poliméricos da indústria calçadista (EVA).** Pesquisa de iniciação científica. Universidade de São Paulo, 2007.

SETRA-LCPC. **Conception et dimensionnement des structures de chaussée, Guide-Technique.** Service d'Études Techniques des Routes et Autoroutes - SETRA, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées – LCPC, Paris, 1997.

TAKATU, R. M. **Utilização dos resíduos de pneus inservíveis na fabricação do asfalto borracha.** 2004. Monografia (Curso superior de tecnologia ambiental). SENAI, São Paulo, 2004.

THIVES, L. P. **Optimização do desempenho de misturas betuminosas com betume modificado com borracha para reabilitação de pavimentos.** 2009. 581 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) Universidade do Minho, Braga, 2009.

VINHA, A. M. **Agente melhorador de adesividade - Produtos asfálticos aplicáveis em pavimentação rodoviária.** Petrobrás Distribuidora S/A. BR Asfaltos, 1975.

YU, J. *et al.* **Preparation and properties of montmorillonite modified asphalts.** Materials science and engineering, v. 447, p. 233-238, 2007.

ZATTERA, A. J. *et al.* **Caracterização de resíduos de copolímeros de etileno acetato de vinila - EVA.** *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, v. 15, n. 1, p. 73-78, 2005.

ANEXO 1

Descrição, aplicações e as propriedades do polímero EVA.



Folha de Dados

Revisão 4 (Maio/10)

Copolímero de Etileno-Acetato de Vinila HM728

Descrição:

Resina semi-amorfa com alto teor de Acetato de Vinila, médio peso molecular e boa compatibilidade com outras resinas e em blendas com termoplásticos, para melhorar a resistência à quebra sob tensão ambiental, resistência ao impacto e à fragilidade a baixas temperaturas. Aditivado com antioxidante.

Aplicações:

Adesivos *Hot-Melt*, *coating*, placas expandidas e produtos injetados e extrusados, onde a flexibilidade, a resiliência e a resistência à quebra sob tensão ambiental são necessárias à aplicação. Nas formulações de adesivos *Hot-Melt* apresentam ótima compatibilidade com ceras, parafinas, agentes de pega etc., promovendo flexibilidade e adesão.

Propriedades de Controle:

	Método ASTM	Unidades	Valores
Índice de fluidez (190/2,16)	D 1238	g/10 min	6,0
Teor de Acetato de Vinila	Braskem (1)	%	28,0

Propriedades Típicas:

Propriedades de Placa³

	Método ASTM	Unidades	Valores
Densidade	D 1505 / D 792	g/cm ³	0,950
Resistência à Quebra sob Tensão Ambiental ^b	D 1693	h/F50	>300
Dureza	D 2240	Shore A / D	80 / 25
Ponto de Fusão	D 3418	°C	77
Ponto de Amolecimento Vicat	D 1525	°C	49

(1) Método Braskem – Disponível na Gerência de Desenvolvimento e Assistência Técnica

(a) Placa moldada por compressão pelo Método ASTM D 4703.

(b) Ensaio realizado em placa de 2 mm, 100% Igepal, 50°C.

APÊNDICE 2

Passo-a-passo da aferição da máquina de ensaio de Fadiga.

Montagem do ensaio:

- 1) 24 horas colar os cps com Araldite®.
- 2) Se houver, tirar os cps anteriores. Lembrar-se de tirar primeiro os parafusos de cima e depois da base.
- 3) Colocar os 4 cps novos. Na base, os parafusos devem estar apertados bem forte, já na parte de cima não forçar muito. Com a outra mão segurar a cabeça do cp para não forçar a célula de carga.

Aferindo a amplitude:

- 4) Com o valor de amplitude calculado na tabela de triagem, aferir com o medidor de deslocamento (por exemplo $A=266$). Esse valor vai mudar toda vez que mudar a deformação de ensaio (120 μ def, 150 μ def e 180 μ def). Para aumentar/diminuir o valor de amplitude, soltar/apertar os parafusos.

Aferindo o deslocamento:

- 5) Abrir o Aqdados 7.02 → ensaio → entradas analógicas → aferição por regressão linear.
- 6) Colocar no canal 4 → ler A/D.
- 7) Apagar os resultados anteriores.
- 8) Inserir no valor de engenharia a metade do valor da amplitude (por exemplo $266/2=133$).
- 9) Girar o excêntrico até o ponteiro parar (máximo e mínimo da deformação). Na medida 0 (zero) girar o medidor até 133.
Para o Canal 4 (cp1) → +133 → inserir → -133 → inserir → 0 (zero) → inserir *
- 10) Se a correlação estiver acima de 98% → aceita os limites calculados.
- 11) Fazer o mesmo para os canais 5, 6 e 7.
- 12) Lembrar-se de apagar os valores anteriores e aceitar os limites calculados de cada canal.
Canal 5 (cp2) = -133, +133 e 0 *

Canal 6 (cp3) = +133, -133 e 0 *

Canal 7 (cp4) = -133, +133 e 0 *

Tirar o relógio e clicar em sair.

*: os sinais (+ ou -) depende se o cp está sendo tracionado ou comprimido ao girar o excêntrico.

Aferindo a célula de carga:

- 13) Na mesma tela do Aqdados 7.02 clicar em aferição por ganho e referência.
- 14) Canal 0 → lerA/D.
- 15) Se o valor estiver próximo do 0,0001... → aceitar os limites calculados.
- 16) Para calibrar, girar o parafuso.
- 17) Fazer o mesmo processo para os canais 1,2 e 3.
- 18) Lembrar-se de aceitar os limites calculados em cada canal → sair.

Ligando a máquina:

- 19) Após as aferições, ligar a máquina na tomada.
- 20) Ligar o botão verde “Geral”.
- 21) Apertar o manual, para que apareça a temperatura da câmara superior.
- 22) Aguardar 6 horas.

Iniciando o ensaio:

- 23) Depois de 6 horas ir para o computador e fechar todas as janelas abertas.
- 24) Abrir o Aqdados 7.02 → ensaio → parâmetros → controle → múltiplo programado (para fadiga) → 642 Hz → 1 s.
- 25) N° do pacote = 1.
- 26) Acertar data e hora. Colocar 1 minuto a mais do que o relógio do computador.
- 27) Ok → ensaio → executar ensaio → liga o botão verde da frequência (Weg®).

Aquisição de dados (excel):

- 28) Abrir programa “Ensaio” → selecionar pasta → meu computador → c: → programa módulo complexo e fadiga → programa módulo complexo e fadiga → programa 2a → ok.
- 29) Selecionar planilha → cópia de modelo → atualizar lista → executar cálculos.

Fim do ensaio:

- 30) Na monitoração de aquisição de dados → pausa → fechar.
- 31) Na relógio da Weg[®] apertar o botão vermelho.
- 32) Abaixar o botão verde “Geral”.
- 33) Tirar a tomada.

APÊNDICE 3

Passo a passo da aferição do ensaio de Módulo Complexo.

Montagem do ensaio:

(idem ao ensaio de Fadiga - Apêndice 1)

Aferindo a amplitude:

(idem ao ensaio de Fadiga - Apêndice 1)

Aferindo o deslocamento:

(idem ao ensaio de Fadiga - Apêndice 1)

Aferindo a célula de carga:

(idem ao ensaio de Fadiga - Apêndice 1)

Ligando a máquina:

- 1) Após as aferições, ligar a máquina na tomada.
- 2) Ligar o botão verde “Geral”.
- 3) Apertar o manual, para que apareça a temperatura da câmara superior.
- 4) Iniciar pela temperatura de -10°C (os procedimentos abaixo devem ser seguidos para as temperaturas de 0° , 10° , 15° , 20° , 30° e 40°).
- 5) Ajustar o temperatura da câmara inferior.
- 6) Aguardar 6 horas para a primeira temperatura e 4 horas para as demais.

Iniciando o ensaio:

- 7) Depois da homogeneização ir para o computador e fechar todas as janelas abertas.
- 8) Abrir o Aqdados 7.02 → ensaio → parâmetros → controle → múltiplo sequencial (para módulo) → 642 Hz → 10 s.
- 9) N° do pacote = 1.
- 10) Ligar o botão verde da frequência (Weg®).
- 11) Ajustar o valor correspondente a primeira frequência (1Hz = 3,15).

- 12) No Aqdados 7.02 → ensaio → executar ensaio.
- 13) Ler 5 pacotes → pause → fechar a janela.
- 14) Colocar as leituras em um pasta separada pelas temperaturas e frequências de teste.
- 15) Repetir o procedimento para as frequências de 3Hz (9,22), 10Hz (30,44), 30Hz (91,09).
- 16) Não se esquecer de colocar o número de pacote = 1 para todas as frequências.
- 17) Desligar o botão vermelho da frequência (Weg®).
- 18) Mudar para a próxima temperatura de teste e lembrar-se de mudar a temperatura na câmara inferior também.

Aquisição de dados (excel):

(idem ao ensaio de Fadiga – Apêndice 1)

Fim do ensaio:

- 19) Abaixar o botão verde “Geral”.
- 20) Tirar a tomada.

APÊNDICE 4

Tabela com os parâmetros para gerar a curva de Equivalência Freqüência-Temperatura do concreto asfáltico convencional.

TEMPERATURA (°C)	FREQÜÊNCIA (Hz)	E* (MPa)	E1 (MPa)	E2 (MPa)	PHI (°)	tr1	tr2	tm	αT	FREQÜÊNCIA (Hz)
-10	30	15129,23476	15114,49	667,842	2,53	12,94	13,97	13,46	0,07	57645,25
-10	10	15050,57252	15034,08	691,8175	2,6	12,94	13,97	13,46	0,07	19215,08
-10	3	14646,23265	14622,89	821,3113	3,2	12,94	13,97	13,46	0,07	5764,52
-10	1	14116,09631	14083,9	949,1526	3,9	12,94	13,97	13,46	0,07	1921,51
0	30	14770,15291	14742,6	901,6963	3,5	51,00	82,82	66,91	0,01	4284,27
0	10	13921,13039	13878,33	1086,815	4,4	51,00	82,82	66,91	0,01	1428,09
0	3	13240,43845	13185,15	1251,715	5,16	51,00	82,82	66,91	0,01	428,43
0	1	12798,90157	12716,85	1442,385	5,99	51,00	82,82	66,91	0,01	142,81
10	30	12050	11946,91	1572,841	7,5	1,11	3,16	2,13	0,47	64,03
10	10	10636,04783	10487	1760,867	9,6	1,11	3,16	2,13	0,47	21,34
10	3	9571,858611	9392,902	1830,756	11	1,11	3,16	2,13	0,47	6,40
10	1	8494,04747	8259,896	1977,779	13,5	1,11	3,16	2,13	0,47	2,13
15	30	10399,34117	10228,5	1877,28	10,4				1,00	30,00
15	10	9720,539714	9530,559	1909,996	11,3				1,00	10,00
15	3	8444,09915	8181,01	2088,737	14,3				1,00	3,00
15	1	6814,00427	6467,151	2143,57	18,3				1,00	1,00
20	30	8859,88784	8609,644	2090,847	13,6	1,78	1,26	1,52	6,57	4,57
20	10	762,9,61488	7336,929	2088,818	15,8	1,78	1,26	1,52	6,57	1,52
20	3	6185,609985	5798,473	2150,829	20,3	1,78	1,26	1,52	6,57	0,46
20	1	4911,715178	4480,058	2011,584	24,1	1,78	1,26	1,52	6,57	0,15
30	30	4643,771683	4158,736	2046,356	25,9	0,77	0,58	0,67	44,63	0,10
30	10	3973,872643	3488,249	1898,858	29,8	0,77	0,58	0,67	44,63	0,03
30	3	2744,344577	2236,02	1588,588	35,4	0,77	0,58	0,67	44,63	0,01
30	1	2000,999877	1551,268	1263,198	39,2	0,77	0,58	0,67	44,63	0,00
40	30	2288,447677	1778,458	1440,167	39	1,59	1,66	1,63	18,42	0,01
40	10	1869,171184	1397,383	1239,394	39,5	1,59	1,66	1,63	18,42	0,00
40	3	1508,953417	1134,402	992,3947	42,4	1,59	1,66	1,63	18,42	0,00
40	1	1050	822	654	37,6	1,59	1,66	1,63	18,42	0,00

Tabela com os parâmetros para gerar a curva de Equivalência
Frequência-Temperatura do concreto asfáltico modificado pelo polímero
EVA.

TEMPERATURA (°C)	FREQUÊNCIA (Hz)	E* (MPa)	E1 (MPa)	E2 (MPa)	PHI (°)	tr1	tr2	trm	αT	FREQUÊNCIA (Hz)
-10	30	13598	13593	349	1,47	94,47	17,80	56,13	0,02	320191,34
-10	10	13132	13122	489	2,2	94,47	17,80	56,13	0,02	106730,45
-10	3	12796	12779	626	2,9	94,47	17,80	56,13	0,02	32019,13
-10	1	12407	12387	688	3,3	94,47	17,80	56,13	0,02	10673,04
0	30	12248	12232	641	3	67,05	28,14	47,59	0,02	5704,34
0	10	12098	12075	725	3,5	67,05	28,14	47,59	0,02	1901,45
0	3	11477	11445	861	4,3	67,05	28,14	47,59	0,02	570,43
0	1	10830	10785	984	5,3	67,05	28,14	47,59	0,02	190,14
10	30	10486	10436	1023	5,3	3,71	4,28	4,00	0,25	119,85
10	10	10033	9960	1205	6,9	3,71	4,28	4,00	0,25	39,95
10	3	9180	9073	1393	8,71	3,71	4,28	4,00	0,25	11,99
10	1	8236	8074	1614	11,4	3,71	4,28	4,00	0,25	4,00
15	30	9457	9353	1398	8,5				1,00	30,00
15	10	8794	8651	1575	10,3				1,00	10,00
15	3	8012	7823	1732	12,5				1,00	3,00
15	1	6742	6507	1759	15,3				1,00	1,00
20	30	7899	7717	1683	13,2	1,41	0,65	1,03	9,73	3,08
20	10	7116	6893	1765	14,4	1,41	0,65	1,03	9,73	1,03
20	3	5942	5665	1788	17,6	1,41	0,65	1,03	9,73	0,31
20	1	4904	4598	1700	20,5	1,41	0,65	1,03	9,73	0,10
30	30	5231	4903	1823	20,4	1,45	1,28	1,36	21,99	0,14
30	10	4233	3854	1748	24,5	1,45	1,28	1,36	21,99	0,05
30	3	3207	2861	1448	27	1,45	1,28	1,36	21,99	0,01
30	1	2486	2190	1175	28,3	1,45	1,28	1,36	21,99	0,00
40	30	2591	2244	1296	30	1,20	1,19	1,19	25,16	0,01
40	10	1999	1688	1070	32,5	1,20	1,19	1,19	25,16	0,00
40	3	1592	1375	803	30,3	1,20	1,19	1,19	25,16	0,00
40	1	1384	1244	607	26	1,20	1,19	1,19	25,16	0,00

APÊNDICE 5

Tabela com os parâmetros para o cálculo da curva de fadiga e as as hipérboles de confiança do concreto asfáltico convencional.

Log(ϵ_i) (10 ⁻⁷)	Log(N)	((No-N)/2)/n	($\epsilon_i - m \cdot \epsilon_i$) ²	Variação (ϵ_i) (10 ⁻⁷)	$\epsilon(0) = \log(\text{Var}(\epsilon_i))$ (10 ⁻⁷)	No = Log(N)	S _o	Log (Ns)	Log (Ni)	Nsuperior	Ninferior
2,2553	5,6532	0,0116	0,0073	180	2,255	5,7905	0,0813	5,8719	5,7092	744499,2339	511888,6809
2,2553	5,5860	0,0148	0,0073	177	2,249	5,8200	0,0778	5,8978	5,7422	790335,2159	552395,2933
2,2553	5,9312	0,0025	0,0073	175	2,242	5,8500	0,0743	5,9243	5,7757	840043,1123	596617,9952
2,2553	5,8388	0,0048	0,0073	172	2,235	5,8804	0,0709	5,9514	5,8095	894078,5995	644915,4286
2,2553	5,9036	0,0031	0,0073	169	2,228	5,9114	0,0677	5,9791	5,8437	952973,3141	697673,7778
2,2553	5,6866	0,0102	0,0073	166	2,221	5,9428	0,0647	6,0075	5,8781	1017351,3556	755305,5143
2,2553	6,1323	0,0001	0,0073	164	2,214	5,9747	0,0619	6,0366	5,9129	1087949,3833	818247,1103
2,2553	5,8510	0,0044	0,0073	161	2,207	6,0072	0,0593	6,0666	5,9479	1165640,5055	886956,0066
2,1761	5,7899	0,0063	0,0000	158	2,199	6,0403	0,0571	6,0974	5,9831	1251461,6597	961907,7249
2,1761	5,9782	0,0016	0,0000	155	2,192	6,0739	0,0554	6,1293	6,0185	1346643,4183	1043594,9022
2,1761	6,0620	0,0005	0,0000	153	2,184	6,1081	0,0541	6,1622	6,0541	1452640,3413	1132530,9994
2,1761	6,0471	0,0007	0,0000	150	2,176	6,1429	0,0533	6,1962	6,0896	1571159,6856	1229261,9353
2,1761	6,0648	0,0005	0,0000	147	2,168	6,1784	0,0531	6,2315	6,1253	1704187,2839	1334388,1455
2,1761	6,3443	0,0013	0,0000	145	2,160	6,2145	0,0536	6,2681	6,1609	1854012,1901	1448597,0766
2,1761	6,2443	0,0002	0,0000	142	2,152	6,2513	0,0547	6,3061	6,1966	2023255,5457	1572702,6591
2,0792	6,6355	0,0094	0,0082	139	2,143	6,2889	0,0565	6,3454	6,2324	2214912,0101	1707685,8911
2,0792	6,6715	0,0109	0,0082	136	2,135	6,3272	0,0589	6,3860	6,2683	2432412,1258	1854731,2528
2,0792	6,1843	0,0000	0,0082	134	2,126	6,3662	0,0619	6,4281	6,3043	2679711,3357	2015257,1048
2,0792	6,7272	0,0135	0,0082	131	2,117	6,4061	0,0654	6,4715	6,3406	2961408,3141	2190942,2812
2,0792	7,0839	0,0363	0,0082	128	2,108	6,4468	0,0695	6,5163	6,3773	3282894,1006	2383753,5437
2,0792	6,3848	0,0020	0,0082	125	2,098	6,4883	0,0740	6,5624	6,4143	3650534,8814	2595978,8778
2,0792	7,0544	0,0340	0,0082	123	2,089	6,5308	0,0790	6,6098	6,4518	4071894,3411	2830270,6937
2,0792	6,0637	0,0005	0,0082	120	2,079	6,5743	0,0843	6,6586	6,4899	4556005,3401	3089701,9969

Tabela com os parâmetros para o cálculo da curva de fadiga e as as hipérboles de confiança do concreto asfáltico modificado pelo polímero EVA.

Log(ϵ_f) (10 ⁻⁷)	Log(N)	((No-N)/2)/n	($\epsilon_f - m \cdot \epsilon_f$) ²	Varição (ϵ_f) (10 ⁻⁷)	$\epsilon(0) = \text{Log}(\text{Var}(\epsilon_f))$ (10 ⁻⁷)	No = Log(N)	S _o	Log (Ns)	Log (Ni)	Nsuperior	Ninferior
2,2553	6,2296	0,0004	0,0072	177	2,249	6,0144	0,0933	6,1077	5,9211	1281588,0384	833849,8141
2,2553	5,6561	0,0193	0,0072	175	2,242	6,0396	0,0893	6,1288	5,9503	1345573,0978	891920,7658
2,2553	5,9823	0,0050	0,0072	172	2,236	6,0651	0,0853	6,1504	5,9798	1413954,0316	954604,2609
2,2553	6,2265	0,0004	0,0072	170	2,229	6,0911	0,0815	6,1726	6,0096	1487891,4265	1022249,9240
2,2553	6,1019	0,0021	0,0072	167	2,223	6,1174	0,0779	6,1953	6,0395	1567844,6205	1095214,5129
2,2553	5,4878	0,0303	0,0072	164	2,216	6,1442	0,0745	6,2187	6,0696	1654593,1188	1173854,9143
2,2553	6,4686	0,0009	0,0072	162	2,209	6,1713	0,0715	6,2428	6,0999	1749061,6461	1258519,7542
2,2553	5,9432	0,0063	0,0072	159	2,202	6,1990	0,0688	6,2677	6,1302	1852348,1572	1349540,6978
2,1761	6,1708	0,0010	0,0000	157	2,195	6,2270	0,0665	6,2935	6,1605	1965753,1269	1447225,5958
2,1761	6,1045	0,0021	0,0000	154	2,187	6,2556	0,0647	6,3203	6,1909	2090807,3164	1551856,8512
2,1761	6,0334	0,0036	0,0000	151	2,180	6,2846	0,0635	6,3482	6,2211	2229294,5640	1663699,1487
2,1761	6,4728	0,0010	0,0000	149	2,172	6,3142	0,0630	6,3772	6,2512	2383266,9606	1783020,0195
2,1761	6,2980	0,0000	0,0000	146	2,165	6,3442	0,0632	6,4074	6,2811	2555052,8235	1910123,8385
2,1761	6,2778	0,0001	0,0000	143	2,157	6,3748	0,0641	6,4389	6,3108	2747262,7537	2045395,1992
2,1761	6,6649	0,0051	0,0000	143	2,157	6,3748	0,0641	6,4389	6,3108	2747262,7537	2045395,1992
2,1761	6,0471	0,0033	0,0000	141	2,149	6,4060	0,0657	6,4717	6,3403	2962803,4781	2189343,4665
2,0792	6,9298	0,0160	0,0083	138	2,141	6,4378	0,0681	6,5058	6,3697	3204910,2403	2342639,5844
2,0792	6,8383	0,0116	0,0083	136	2,132	6,4701	0,0711	6,5412	6,3990	3477205,2742	2506139,8680
2,0792	6,6893	0,0059	0,0083	133	2,124	6,5031	0,0748	6,5779	6,4283	3783784,6124	2680897,3258
2,0792	6,5840	0,0030	0,0083	130	2,115	6,5367	0,0791	6,6159	6,4576	4129331,6418	2868165,5649
2,0792	7,0819	0,0251	0,0083	128	2,107	6,5711	0,0840	6,6551	6,4871	4519255,3109	3069401,6935
2,0792	6,2778	0,0001	0,0083	125	2,098	6,6061	0,0894	6,6955	6,5167	4959853,1594	33520673,6999
2,0792	7,1258	0,0281	0,0083	123	2,089	6,6418	0,0952	6,7371	6,5466	5458502,7971	3520673,6999
2,0792	6,0465	0,0033	0,0083	120	2,079	6,6784	0,1015	6,7799	6,5769	6023888,9168	3774743,8208